Spektrum
DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT
OKTOBER 2007 10/07

KLIMAWANDEL
Warum sich die Experten so sicher sind

TECHNOLOGIE
Nano-Röhrchen für Solarzellen und E-Paper

ARCHÄOLOGIE
Das vergessene Reich der Jinsha

Der Gedächtnis-Code

Aus Gehirnsignalen können Forscher die Inhalte von Erinnerungen entschlüsseln

7,40 € (D/A) · 8,– € (L) · 14,– sFr
D6179E

EDITORIAL

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Eine vergessene Hochkultur

Archäologie in China beschäftigt sich meist mit den Kaisern und ihrer prunkvollen Hinterlassenschaft. Fleißige Hofbeamte protokollierten ab dem 3. Jahrhundert v. Chr. akribisch das politische Geschehen. Doch die antiken Schriften erfassen hauptsächlich das Kernland des alten Reichs. Was außerhalb geschah, war den Beamten kaum eine Zeile wert.

Umso erstaunlicher, wenn nun, eher zufällig, gerade aus diesen Regionen umfangreiche Kulturzeugnisse zu Tage treten. Im Westen der Sichuan-Tiefebene stießen Arbeiter vor sechs Jahren beim Bau einer Autobahn auf Jadeschmuck und Stoßzähne von Elefanten. Der Fund war Anlass für eine gigantische Grabung auf mehreren Quadratkilometern. Dort erschließen die Archäologen seitdem die Relikte einer hoch entwickelten Gesellschaft: der fast völlig vergessenen Jinsha-Kultur, die etwa um 1000 v. Chr. ihre Blütezeit hatte. Zwei Berliner Forscher haben für uns ihre Zeitreise in die chinesische Antike aufgezeichnet (S. 96).

Es war vor 54 Jahren, als der Doktorand Stanley Miller an der Universität von Chicago ein simples Experiment startete. Durch eine Mixtur aus Stickstoff, Methan, Wasserstoff und Wasser leitete er elektrische Blitze. Nach einer Woche analysierte er das Gebräu und fand Aminosäuren sowie weitere Grundbausteine biologischer Moleküle.

Seither wird intensiv nach den Anfängen des Lebens gefahndet. Aber auch ein halbes Jahrhundert später hat sich vor allem gezeigt, dass der Fall doch viel komplizierter ist. Von Millers einfachen Bausteinen bis hin zu sich selbst reproduzierenden Makromolekülen oder gar Zellen führt ein weiter Weg.

Entsprechend unklar blieb bis heute auch, wo die feine Grenze zwischen unbelebter und belebter Natur verläuft. Wie der US-Geologe Robert Hazen in seinem Essay schildert, kann eine klare Trennlinie zwischen Leben und Nichtleben gar nicht gezogen werden (S. 66).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

NEUERUNGEN

Beim Blättern in dieser Ausgabe wird Ihnen sicher die veränderte Gestaltung auffallen. Sie soll unsere Themen noch interessanter und sichtbarer machen und Sie in die Geschichten hineinziehen. Lassen Sie sich fesseln!

- Die **Ressortierung der Artikel** – ihre Zuordnung zu übergreifenden Themenkomplexen – soll Ihnen helfen, Beiträge aus Ihrem Lieblingsgebiet leichter zu finden.
- **Durchgehende Randspalten** bei den Hauptartikeln bieten vertiefende Informationen aus dem Umkreis des jeweiligen Themas.
- Ein **übersichtlicheres Inhaltsverzeichnis** ermöglicht es, das vielfältige Themenangebot des Hefts besser zu erschließen.
- Unser **reichhaltiges Online-Angebot** ist noch enger mit den Inhalten der gedruckten Ausgabe verflochten.

Mitten im Markt Messe Stuttgart

VISION 2007

20. Internationale Fachmesse für industrielle Bildverarbeitung und Identifikationstechnologien

Neue Messe Stuttgart
6.- 8. November 2007

Schlüsselerlebnis.

Prozessoptimierung muss nicht teuer sein. Davon könnten Sie sich auf der Weltleitmesse für industrielle Bildverarbeitung überzeugen. Dank der neuesten Entwicklungen werden die Systeme und Komponenten immer leistungsfähiger. Das Gute dabei: Sie werden damit auch günstiger. So rechnen sich die niedrigen Investitionen bereits nach wenigen Monaten. Entdecken Sie Ihre individuelle IBV-Lösung jetzt auf der VISION 2007, auf Europas modernstem Messegelände.

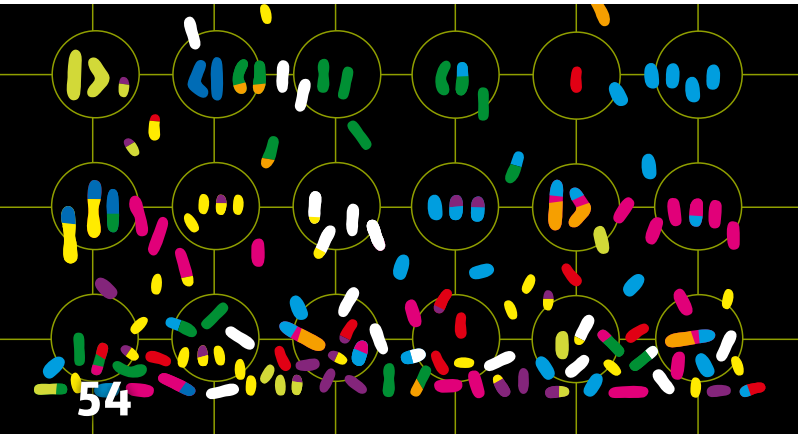
www.vision-messe.de

Hin und zurück an 1 Tag!
In 5 Minuten zu Fuß von Deutschlands zweitgrößter Destination für Billigflieger auf die Neue Messe Stuttgart

INHALT

OKTOBER 2007

ASTRONOMIE & PHYSIK **Duell der Felder**



MEDIZIN & BIOLOGIE **Chromosomen-Chaos und Krebs**

ERDE & UMWELT **Die Wissenschaft hinter dem Klimawandel**

AKTUELL

12 Spektrogramm
Planet im Sternquartett · Chipkühlung mit Ionenwind · Schlank durch schwere Knochen · Logisch begabte Krähen u. a.

15 Bild des Monats
Manta der Lüfte

16 Lichtleiter in der Netzhaut
Die Retina ist von einer Mattscheibe aus Neuronen bedeckt. Warum können wir trotzdem scharf sehen?

19 Interview: Menschwerdung
Gespräch mit Friedemann Schrenk über Neues vom *Homo habilis*

21 Mannheims vergessene Mumien
Sie waren im Lager verschollen; nun sorgen sie für überraschende Befunde

24 Springers Einwürfe
Prost Mahlzeit!

ASTRONOMIE & PHYSIK

26 Duell der Felder
Lange Zeit nahmen Teilchenphysiker und Kosmologen kaum Notiz voneinander. Dabei wollten doch beide dasselbe wissen: warum Teilchen eine Masse haben. Die unsichtbare Grenzlinie wurde erst infolge von Umbrüchen in den 1970er Jahren überschritten

34 Bricht die »Goldene Dekade der Astroteilchenphysik« an?
Spektrum der Wissenschaft sprach mit Franz von Feilitzsch, Mitverfasser eines europäischen Strategiepapiers

36 Warum die Tage länger werden
Beobachtungen von Sonnenfinsternissen aus fast drei Jahrtausenden belegen: Die Erde rotiert immer langsamer. Dank babylonischer Keilschriften und chinesischer Chroniken lässt sich genau ermitteln, welche Faktoren die Tageslänge beeinflussen

MEDIZIN & BIOLOGIE

TITELTHEMA

46 Der Gedächtniskode
Wie verschlüsselt das Gehirn Erinnerungen? Forscher sind diesem Kode auf der Spur. Mit ihm ließen sich nicht nur Gedanken lesen, sondern auch klügere Computer bauen

54 Chromosomen-Chaos und Krebs
Eine neue Theorie, die statt der Gene die Chromosomen in den Mittelpunkt rückt, kann möglicherweise bisher rätselhafte Aspekte von Krebs erklären

66 Essay: Was ist Leben?
Es gibt keine allgemein gültige Definition dafür. Deshalb würden wir fremde Lebensformen im Kosmos vielleicht gar nicht erkennen

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial
8 Leserbriefe
9 Impressum
71 Rückblick
106 Rezensionen
112 Vorschau

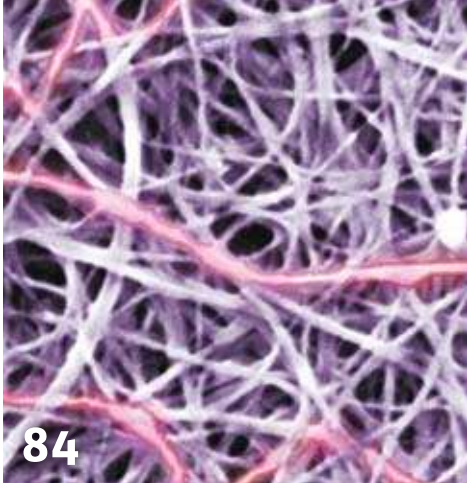
Titelillustration: Jean-François Podevin

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

TITELTHEMA

Der Gedächtniskode

46



84

TECHNIK & COMPUTER

Kohlenstoff-Nanonetze

96

MENSCH & GEIST

Schätze des Jinsha-Reichs

ERDE & UMWELT

72 ▶ **Die Wissenschaft hinter dem Klimawandel**
Warum sind sich die Experten so sicher, dass der Mensch die Erde aufheizt? Autoren des jüngsten UN-Klimaberichts fassen die Argumente zusammen und diskutieren verbleibende Unsicherheiten

IN DIESEM HEFT: **SciTechs**
Magazin für Technologietransfer

TECHNIK & COMPUTER

82 **Wissenschaft im Alltag**
Flachbildschirm – dank LCD- und Plasmatechnik kommt Fernsehen dem Kinoerlebnis immer näher

84 ▶ **Kohlenstoff-Nanonetze**
Aus einem Gewirr winziger Kohlenstoffröhren könnte schon bald eine preiswerte Elektronik hervorgehen. Auf der Agenda stehen Transistoren, gedruckte Solarzellen und »elektronisches Papier«

MENSCH & GEIST

93 **Mathematische Unterhaltungen**
Geordnetes Gestrüpp: Geeignet geformte Balken lassen sich so verkeilen, dass der Holzstoß die Symmetrie eines platonischen Körpers hat

96 ▶ **Schätze des Jinsha-Reichs**
An einem Ort, wo niemand dergleichen vermutet hätte, entdeckten chinesische Archäologen eine reiche Kultur

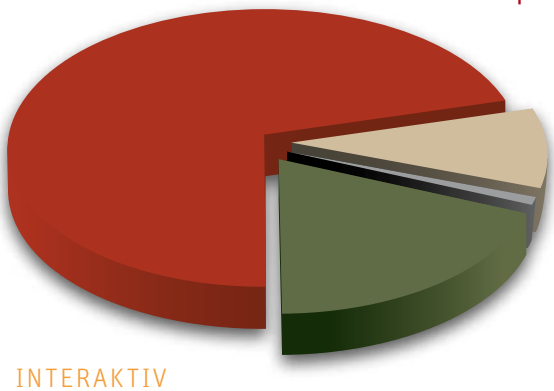
Thema der Woche

e·on
Neue Energie

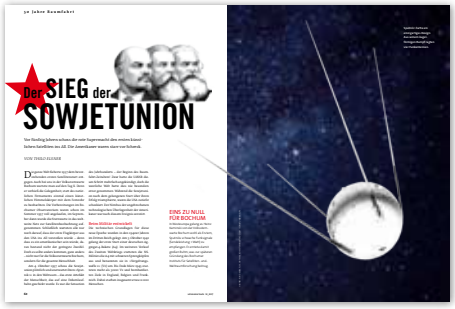
ONLINE

CORBIS

spektrumdirekt Gespanntes Warten auf die Nobelpreise
www.spektrumdirekt.de/nobelpreise



INTERAKTIV
Wie gefällt Ihnen unser neues Heftkonzept?
www.spektrum.de/lesermeinung



FREIGESCHALTET »Sieg der Sowjetunion«
www.astronomie-heute.de/sputnik

spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

Gespanntes Warten auf die Nobelpreise

Ab dem 8. Oktober werden binnen acht Tagen die Namen der diesjährigen Nobelpreisträger verkündet. Wir informieren zeitnah: Jeden Abend nach einer Preisverleihung werden Sie online lesen können, welche Entdeckungen die Jury überzeugten
www.spektrumdirekt.de/nobelpreise

Nanotechnologie – schrumpfende Bauteile und ihre Anwendung

Klein, kleiner, am kleinsten – Miniaturisierung ist »in« und der Nano-Baukasten hat immer mehr zu bieten. Mit winzigen Komponenten allein ist es jedoch nicht getan – sie müssen auch zusammenarbeiten. Und hier offenbaren sich ganz besondere Tücken
www.spektrumdirekt.de/nano

TIPPS

Sie hören von uns – noch bevor Sie uns lesen

Unser Podcast »Spektrum Talk«, den monatlich Tausende Besucher unserer Homepage abrufen, ist künftig aktueller als das jeweils neue Heft. Bereits einige Tage vor dessen Erscheinen erwarten Sie hier Interviews mit Autoren und Redakteuren zu unseren kommenden Themen
www.spektrum.de/talk

WiS! – Wissenschaft in die Schulen

Wer sich früh in wissenschaftlicher Denkweise übt, hat es beim Studium leichter. Mit dem Projekt WiS! unterstützt der Spektrum-Verlag Lehrer und andere Pädagogen bei ihrer Arbeit. Online-Materialien etwa zu Stringtheorie, Tsunamis oder Immunsystem finden Sie auf
www.spektrum.de/wis

INTERAKTIV

Umfrage: **Wie gefällt Ihnen unser neues Heftkonzept?**

Das Auge liest mit – und darum ist uns die Gestaltung und Struktur unseres Magazins stets von Neuem ein Anliegen. Im aktuellen Heft haben wir eine ganze Menge Veränderungen vorgenommen. Zum Besseren? Sagen Sie es uns auf
www.spektrum.de/lesermeinung

Nach uns geht es weiter

»Die Welt ohne uns«: ein ungewohnter Gedanke. Wie würde diese Welt aussehen? Der Wissenschaftsjournalist Alan Weisman – für die Novemberausgabe haben wir ihn auch interviewt – hat ein hochspannendes Szenario entwickelt. Hier stellen wir sein jüngstes Buch vor. Sie haben es schon selbst gelesen? Dann bewerten Sie es nach unseren 5x5-Kriterien!
www.spektrumdirekt.de/welt-ohne-uns

FÜR ABONNENTEN

»Wie die Zeit in den Kopf kommt«

Im Hier und Jetzt erscheinen uns ereignisreiche Phasen kurz, monotone dagegen lang – in der Erinnerung ist es umgekehrt. Wie unser Zeitempfinden zu Stande kommt, darüber streiten Psychologen und Hirnforscher. Doch eines zeigen ihre Expeditionen in die vierte Dimension schon jetzt: Unser Gespür für Zeit ist tief im Gehirn verankert

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

»Eindämmung des Kohlendioxids«

Die globale Erwärmung ist real (siehe Beitrag S. 72). Wie sich die Kohlenstoffemission einfrieren lässt, ohne die Wirtschaft zu bedrohen, zeigen US-Wissenschaftler im Spektrum-Spezial »Energie und Klima« 1/07

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE UNTER

www.spektrum.de/artikel/904257

»Der Sieg der Sowjetunion«

Vor fünfzig Jahren, im Oktober 1957, fieberte die Welt dem ersten Satellitenstart entgegen. Und natürlich würden die Amerikaner die Nase vorn haben. Dann hob plötzlich und unerwartet »Sputnik 1« ab – von einem Startplatz nördlich des Kaspischen Meers

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE UNTER

www.astronomie-heute.de/sputnik

Alle Publikationen unseres Verlags sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
Telefon 06221 9126-743

Spektrum.de
DER WISSENSCHAFT

Heftarchiv
www.spektrum.de/archiv

Spektrum Notizen
www.spektrum.de/notizen

Spektrogramm
www.spektrum.de/spektrogramm

Spektrum Tagebuch
www.spektrum.de/tagebuch

Spektrum Talk
www.spektrum.de/talk

Spektrum in die Schulen
www.spektrum.de/wis

Der Mathematische Monatskalender
www.spektrum.de/monatskalender

Leserbriefe
www.spektrum.de/leserbriefe

Newsletter
www.spektrum.de/newsletter

DIESE UND WEITERE RUBRIKEN FINDEN SIE AUF DER NAVIGATIONSLEISTE UNSERER HOMEPAGE

Bioerdgas hat viele Talente.

E.ON fördert aktiv die Erdgaserzeugung aus Biomasse. Denn dieser erneuerbare Energieträger trägt dazu bei, den CO_2-Ausstoß deutlich zu reduzieren. Bioerdgas kann ganzjährig produziert und problemlos gespeichert werden. In das bestehende Erdgasnetz eingespeist, kann Bioerdgas vielfältig genutzt werden: z. B. an Erdgastankstellen, in Erdgasheizungen und in Kraftwerken. So werden Kraftwerke durch die Nutzung von Bioerdgas noch effizienter in Sachen Klimaschutz. Einfach eine saubere Sache.

Mehr zur Zukunft von Bioerdgas erfahren Sie unter www.eon.com

e·on
Neue Energie

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Schon 1895 hatte F. Schneider die Idee einer Funkuhr – hier ein modernes Modell.

Erfinder der Funkuhr

Atomzeit am Handgelenk
Wissenschaft im Alltag, August 2007

Bereits am 24. 3. 1895 stellte der Uhrmacher Ferdinand Schneider in Fulda bei einem Vortrag vor dem Werkmeister-Bezirks-Verein die »Telegraphie ohne Draht« vor (Fuldaer Kreisblatt, 23. 3. 1895). 15 Jahre später entwickelte er die funkgesteuerte Uhr (Patent-Nr. 237 428). Er hatte die Idee der exakten »Weltuhr«: Die Uhren sollten über einen ferngesteuerten Impuls, aufgenommen durch einen Fritter-Empfänger, von einem Sender aus synchronisiert werden.

Finanzielle Probleme und der Erste Weltkrieg verhinderten 1914 die Realisierung seiner Erfindung, die Sendeanlage wurde vom Militär beschlagnahmt.

Michael Pigulla, Bad Salzschlirf

Ein Leben voller Hilfen

Body-Modification
Rezension, Juli 2007

Die Besprechung lässt aus, dass Kasten mehrere Motivgruppen für das Amputationsbegehren angibt und die Autoren zitiert. Aber er nennt nur vordergründige Motive (sexuelle, exhibitionistische, gruppendynamische, imitatorische, Renten begehrende), weil die Amputationspatienten den eigentlichen Beweggrund verheimlichen. Dabei stehen Umschreibungen des Ziels durchaus im Text: wie glücklich sie seien, wie vollständig ohne eins der Beine oder Arme. Ich kenne aus stationären Behandlungen und Gutachten sowohl Transsexuelle wie Amputierte: junge Frauen, die eine ließ ein Bein, die andere den linken Arm und das rechte Bein amputieren. Beide arbeiteten mit Fäulnisquellen, die eine mit faulem Hack, bei der anderen wurde es vor Jahrzehnten nicht aufgedeckt.

Beide hatten nach meinen Befunden das gleiche Ziel: nicht erwachsen werden zu müssen, ein Leben voller Hilfen für eine Hilflose zu führen. Denn das Tragen von Prothesen und Rehabilitation kommen überhaupt nicht vor, die entstehenden Stümpfe sind deshalb auch zu kurz: zirka 10 Zentimeter. Empfindungen von und Klagen über Amputationsphantome werden nicht geäußert.

Es geht also um eine nach der Operation unumkehrbare Lebenssicherung ohne die normalen Erwachsenensorgen. Dabei ist die unerlässliche Regression ins kindlich Hilfebedürftige ein instinktives Sicherungsverhalten, das wir alle ohnehin jede Nacht anwenden und erleben.

Mehr Informationen über die Methoden, solche Zusammenhänge zu erkennen und zu behandeln, können Sie in meinem Buch »Die unsichtbare Pyramide. Die Anatomie der menschlichen Seele« lesen.

Prof. J. M. Burchard, Hamburg

Kein Anlass zu Euphorie

Volltanken mit Wasserstoff, Juli 2007

Vermeintlich CO_2-neutrale Wasserstoffantriebe geben keinen Anlass zu Euphorie: Metallhydridspeicher mit genug Reichweite für 500 Kilometer würden 450 Kilogramm wiegen, Kryotanks rasant verdunsten. Wohl kaum ein Schritt in die richtige Richtung.

Was die Umweltfreundlichkeit betrifft, so muss der komplette Wasserstoffkreislauf von der Erzeugung über den Transport bis zur Energieverwertung in Betracht gezogen werden.

Eine positive Entwicklung ist in erster Linie über die radikale Abkehr von heutigen Mobilitäts- und Prestigeansprüchen und eine »De-Individualisierung« des Nahverkehrs zu erreichen.

Volker Bartheld, München

Das Optimum erzielen

Das Urlauberdilemma, August 2007

Durch Kooperation zum Maximum

Eine Möglichkeit, aus dem Dilemma herauszukommen, wäre eine Kooperation der Spieler in dem Sinn, dass sie die Summe ihrer beiden Auszahlungen maximieren und diese dann halbe-halbe aufeinander verteilen. Das Maximum der Summe wäre dann 200, und jeder bekäme 100.

Das Strategienpaar (100, 100) ist übrigens ein so genanntes Pareto-Optimum, das dadurch definiert ist, dass eine Vergrößerung der Auszahlung eines Spielers durch Änderung seiner Strategie (zum Beispiel durch die Wahl von 99 an Stelle von 100, was ihm die Auszahlung 101 sichern würde) notwendig zu einer Verkleinerung der Auszahlung an den anderen Spieler (nämlich zu 97 an Stelle von 100) führt. (In diesem Fall wäre die Gesamtauszahlung nur 198.) Auf die gleiche Weise ist es auch möglich, aus dem Gefangenendilemma herauszukommen.

Prof. W. Krabs, Darmstadt

Weit vom Nash-Gleichgewicht

Beim oft zitierten Nash-Gleichgewicht wird davon ausgegangen, dass beide Personen komplett unabhängig voneinander agieren. Ein streng rationaler Spieler A, der darauf vertraut, dass auch sein Konterpart B logisch korrekt handelt, muss zum Schluss kommen, dass B die gleiche Entscheidung wie A treffen wird – zumindest in Spielen mit symmetrischer Auszahlung. Damit reduziert sich das Problem auf nur noch einen Freiheitsgrad. Konkret sind nur noch die Felder in der Diagonale der Auszahlungsmatrix erlaubt. Unter dieser Bedingung wird schnell klar, dass A und B die Wahl 100/100 treffen und damit auch »gesamtwirtschaftlich« das Optimum erzielen. Nicht ganz so rationale Akteure – oder »Bauchentscheider« – werden mehr oder weniger davon abweichen, aber in der Regel immer noch weit vom Nash-Gleichgewicht liegen, da sie auf das Gute (oder die Logik?) im anderen vertrauen.

Dr. Wolfgang Zesch, Zürich

Wegen der ungewöhnlich lebhaften Beteiligung werden wir im November-Heft noch einen Essay zum Urlauberdilemma bringen und dabei auch eine Auswahl an Leserbriefen abdrucken und kommentieren. Die Redaktion

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief direkt in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit Ihrer vollständigen Adresse an:
Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Medizinische Wirkung von Speisen

Gesunde Würze
Spektrogramm, August 2007

Mein Leben lang koche ich sehr gern und habe mich daher notgedrungen mit Zen-Kochkunst, chinesischer, thailändischer, indischer, mediterraner, vollwertiger und experimenteller Küche beschäftigt, da die traditionelle deutsche Küche an Geschmacksarmut und Bekömmlichkeit leider gleich hinter der britischen und der russischen rangiert.

Und so gut wie überall bin ich der Ansicht oder dem Wissen begegnet, dass Würzen nicht nur den Geschmack, sondern zugleich die Bekömmlichkeit des Essens beeinflusst und im Idealfall verbessert.

Nicht nur den meisten Kräutern und Gewürzen, auch den Grundzutaten wird eine medizinische Wirkung zugeschrieben. Mit anderen Worten: Jede Speise ist zugleich Medizin, das heißt, sie hat außer ihrer sättigenden zugleich eine medizinische Wirkung – sie stopft, führt ab, kühlt, erhitzt, gleicht aus, energetisiert, beruhigt, reizt oder pflegt die Verdauungsorgane und wirkt gegen diese oder jene Beschwerden oder ruft sie hervor – je nachdem, wie die Ingredienzien eingesetzt, kombiniert und zubereitet werden. Man kann also die Münchner Forscher nur zu ihrem Erfolg beglückwünschen.

Dr. Gerhard Rudolf,
Bad Homburg v. d. Höhe

Schlangen im Gleitflug

Fliegende Eidechse aus der Kreidezeit, Spektrogramm, Juni 2007

Im Artikel wird eine fliegende Eidechse aus der Kreidezeit beschrieben, die offensichtlich mittels einer Membran, die zwischen ihren verlängerten Rippen aufgespannt war, durch die Luft gleiten konnte. Auch die so genannten fliegenden Schlangen der Gattung *Chrysopelea* aus Südostasien spreizen beim Flug die Rippen nach außen. Dabei nimmt die Unterseite die Form einer Tragfläche an, wodurch die Schlangen auch weite Strecken im Gleitflug überwinden können. Zum Glück gibt es Filmaufnahmen vom Gleitflug der Schlange wie unter www.flyingsnake.org, denn in freier Wildbahn ist es fast unmöglich, die genannte Schlange im Flug zu bewundern.

Martin Rabe, Hagen

Vorgang widerspricht dem gesunden Krähenverstand

Intelligenztests für Kolkraben
Juli 2007

Habe ich doch noch geschmunzelt über die arme Krähe, die ob einem scheinbar unlogischen Arrangement von Schnur und Futter schier verzweifelt. Und dann, einige Seiten später, beim Artikel über Quantenmechanik, kann ich der Krähe nachfühlen. Die Quantenmechanik widerspricht dem »gesunden Menschenverstand« derart, dass ich sie weit von mir weisen würde, wüsste ich sie nicht vielfach experimentell bestätigt.

ZHAO CHUANG UND XING LIDA

Nicht nur die urtümlichen Eidechsen – hier eine Zeichnung –, auch die so genannten fliegenden Schlangen der Gattung *Chrysopelea* spreizen beim Flug die Rippen nach außen.

Ebenso wie wir in der Physikvorlesung die Formeln der Quantenmechanik pauken, könnte eine Krähe wohl lernen, wie sie an das Futter kommt, und trotzdem würde der ganze Vorgang immer noch ihrem »gesunden Krähenverstand« widersprechen.

Roman Kontic, Basel

Happy Birthday, EPO

Hormon aus Nieren
Rückblick, August 2007

Der Artikel über die Entdeckung von Erythropoeitin vor 50 Jahren kam genau richtig zur Tour de France. Ich möchte der Redaktion keine Absicht unterstellen, aber ein bisschen schmunzeln musste ich schon.

P. Ehle, Helsa

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke;
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle (Ltg.), Christina Peiberg (stv. Ltg.), Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels;
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Hermann Englert, Dr. Markus Fischer, Bernhard Gerl, Dr. Ingrid Horn, Dr. Rainer Kayser, Dr. Sven Titz.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/sFr 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten.
Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an.
Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls;
Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen:
Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-150, Fax 030 6159005;
Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-184, Fax 040 30183-283;
Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099;
Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555;
Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49;
München: Bernd Picker, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 28a vom 01. 01. 2007.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2007 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Chairman: Brian Napack, Vice President and Managing Director, International: Dean Sanderson, Vice President: Frances Newburg, Circulation Director: Christian Dorbrandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

ROBERT GAST / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

SINNESWAHRNEHMUNG

Wen juckt's?

Noch hilft gegen Juckreiz nur Kratzen. Doch die Entdeckung eines Gens für die Wahrnehmung dieses Reizes weckt Hoffnungen auf ein Medikament dagegen.

Die meisten von uns kennen Juckreiz nur von Mückenstichen. Er ist zwar unangenehm, geht aber vorüber. Manche Menschen leiden jedoch unter chronischem Jucken, das ihren Alltag zur Qual werden lässt. Dass wirksame Therapien dagegen bis heute rar sind, liegt an einem wissenschaftlichen Irrtum: Jucken wurde lange Zeit als abgeschwächte Form von Schmerz betrachtet und deshalb nicht eigens erforscht.

Auch Zhou-Feng Chen und sein Team an der Washington-Universität in St. Louis interessierten sich für die Mechanismen der Schmerzübermittlung. Deshalb untersuchten sie das Gen für ein Rezeptorprotein namens GRPR *(gastrin-releasing peptide receptor)*. Es kommt in Rückenmarkszellen vor, die bekanntermaßen an der Weiterleitung von Schmerzsignalen beteiligt sind. Doch als die Forscher Knock-out-Mäuse züchteten, bei denen das Gen gestört war, reagierten diese weiter auf Schmerzreize. Normale Nager kratzten sich dagegen, wenn der Rezeptor künstlich stimuliert wurde.

Das legte nahe, dass GRPR mit der Wahrnehmung von Juckreiz zu tun haben könnte. Als Test behandelten Chen und seine Mitarbeiter die Knock-out-Mäuse mit Juckpulver. Und siehe da: Die Tiere kratzten sich deutlich weniger als ihre Artgenossen mit intaktem Erbmaterial. Dass ein separater Signalweg für Juckreize entdeckt wurde, weckt nun die Hoffnung, sie künftig auch gezielt unterdrücken zu können.

Nature, Bd. 448, S. 700

VERHALTEN

Krähen können logisch denken

Die Neukaledonische Krähe erlangte vor einigen Jahren Berühmtheit, weil sie als einziger Vogel aus Stöcken und Blättern gezielt Werkzeuge herzustellen vermag. Jetzt haben Forscher an der Universität Auckland (Neuseeland) herausgefunden, dass das Tier sogar mehrere Hilfsmittel in einer logischen Abfolge einsetzen kann.

Im Versuch sollten die Krähen ein Stück Fleisch mit einem Stock erreichen, der allerdings zu kurz war. Sie benutzten ihn daraufhin, um einen längeren Ast aus einer Kiste zu angeln. Damit holten sie sich schließlich das gewünschte Futter. »Für diese kreative Leistung mussten die Krähen zunächst ihren natürlichen Drang unterdrücken, mit dem kurzen Stock nach dem Fleisch zu stochern«, sagt Russell Gray, einer der neuseeländischen Forscher.

Das komplexe Problem könnten die Tiere gelöst haben, indem sie eine erprobte Strategie – Essen außerhalb ihrer Reichweite mit einem Ast zu angeln – auf die neue Situation übertrugen: Sie besorgten sich damit erst einmal ein besseres Werkzeug. Analoges Schlussfolgern gilt als Merkmal menschlicher Intelligenz und wurde ansonsten bisher nur bei Menschenaffen beobachtet. Nach Meinung der Forscher dürfte es auch andere intelligente Verhaltensweisen der Vögel erklären, die sogar einen Draht zum Haken biegen können, um damit an Futter zu gelangen.

Current Biology, Bd. 17, S. 1

ALEX TAYLOR, UNIVERSITY OF AUCKLAND

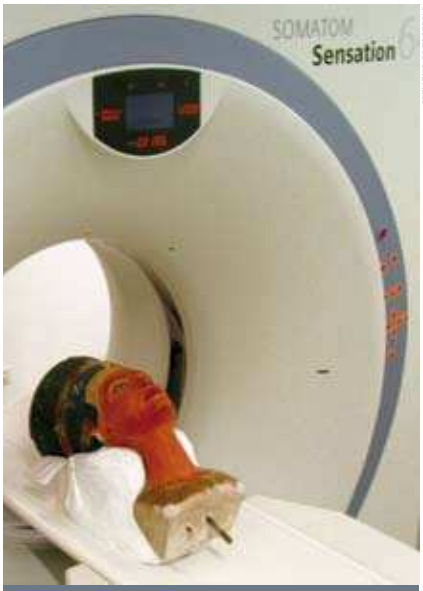
Diese Krähe angelt mit einem kurzen Stock einen längeren, um mit diesem dann ein Stück Fleisch zu erreichen.

ARCHÄOLOGIE

Nofretete entzaubert?

Die Büste der ägyptischen Königin Nofretete ist ein Prunkstück des Ägyptischen Museums in Berlin. Im Juli blieb ihre Vitrine allerdings kurzzeitig leer. An der Berliner Universitätsklinik Charité untersuchten Wissenschaftler im Auftrag der Zeitschrift »National Geographic« die berühmte Skulptur in einem Computertomografen.

Schon vor 15 Jahren war in ihrem Inneren bei einer ähnlichen Durchleuchtung nämlich eine zweite Büste aus Kalkstein entdeckt worden. Die moderne Röntgenanalyse hat das nicht nur bestätigt, sondern auch erstmals genaue Bilder der verborgenen Struktur geliefert. Sie zeigt eine ältere



SIEMENS-PRESSEBILD

Nofretete im Computertomografen

Dame mit Fältchen um den Mund, schmalem Hals und leicht asymmetrischen Schultern.

Ist dies das wahre Gesicht der Nofretete? Dietrich Wildung, Direktor des Ägyptischen Museums, glaubt das nicht. Seiner Meinung nach hat der Künstler zunächst ein grobes Abbild aus Kalkstein hergestellt und das wirkliche Antlitz mit Gips aufmodelliert. Dafür sprechen auch Augenfältchen, die erst nachträglich in die Gesichtspartie eingearbeitet wurden – wohl als realistische Darstellung erster Altersspuren.

Im Ägyptischen Museum wird Nofretetes Gesicht darum von jetzt an aus einem anderen Winkel angestrahlt: »Wir betonen die Augenpartie und zeigen die Spuren eines erfahrungsreichen Lebens und des Alterns«, sagt Wildung.

Pressemitteilung der Siemens AG

BEIDE FOTOS: KAI SCHÜTTE, ZOOLOGISCHES INSTITUT UND MUSEUM HAMBURG

Zu den 43 Tierarten, die nun auf Madagaskar neu entdeckt wurden, zählen auch diese beiden Exoten: ein Riesenkugler (oben) und ein Feuertausendfüßer (links) aus der Gattung *Aphistogoniulus*.

BIOLOGIE

Neue Arten im Dutzend

Weil Madagaskar sich schon vor 90 Millionen Jahren von Indien trennte, entwickelten sich dort Lebensformen, die nirgendwo sonst auf der Welt existieren. Den meisten dieser Tiere und Pflanzen wird durch die menschliche Besiedlung jedoch die Lebensgrundlage entzogen. So sind nur noch vier Prozent des Regenwalds übrig, der früher die ganze Insel überzog. Die Kartierung der Flora und Fauna ist deshalb ein Wettlauf gegen die Zeit. Dabei konnten zwei Doktoranden vom Zoologischen Institut und Museum Hamburg und vom Museum Koenig in Bonn jetzt einen beachtlichen Erfolg erringen: Im Südosten von Madagaskar entdeckten sie gleich 43 neue Arten von Tausendfüßern und Insekten, darunter Stabschrecken, Gottesanbeterinnen und Libellen.

Das Verbreitungsgebiet vieler dieser Tiere ist sehr klein. Biologen bezeichnen das als Mikroendemismus – auf Madagaskar ein typisches Phänomen, weil die wenigen verbliebenen Wälder oft weit voneinander entfernt und durch unfruchtbare Steppengebiete getrennt sind, die für die Insekten ein unüberwindbares Hindernis darstellen. So entwickelten sich in verschiedenen Wäldern zum Beispiel eigene Arten von Riesenkuglern: Tausendfüßern, die sich komplett zu einer Kugel einrollen und dabei die Größe einer Apfelsine erreichen können.

Die neuen Funde belegen einmal mehr eindrucksvoll die erstaunliche Biodiversität Madagaskars. Das Artenparadies im Indischen Ozean scheint jedoch dem Untergang geweiht: Mit jedem kleinen Wald verschwindet ein eigener Mikrokosmos für immer von der Erdoberfläche.

Pressemitteilung des Museums Koenig

ASTRONOMIE

Sternquartett mit Planet?

Stanislaw Lem beschreibt in »Solaris« einen Planeten, der einen Doppelstern umläuft, sodass spektakuläre zweifache Sonnenuntergänge stattfinden. Aus Sicht unseres gewohnten Sonnensystems erscheint das exotisch. Aber vielleicht kommt es häufiger vor als vermutet. Neueste Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop Spitzer sprechen jedenfalls dafür. Demnach könnten selbst Systeme aus vier Sternen noch Planeten haben.

Ein solches System ist das 150 Lichtjahre entfernte Objekt HD 98800. Darin bilden vier Sonnen zwei Doppelsternpaare, die sich in großem Abstand umkreisen. Wie Forscher der Universität von Arizona jetzt mit Spitzers Hilfe herausfanden, haben sich um eines der Paare in unterschiedlichen Abständen zwei Ringe gebildet. Aus solch konzentrischen Ansammlungen von Materie gehen nach heutigem astronomischem Verständnis Planeten hervor.

Im Fall von HD 98800 besteht der äußere Ring des Doppelsterns hauptsächlich aus Asteroiden und Kometen. Kollidieren diese auf ihrer Umlaufbahn, entsteht feiner Partikelstaub, der zum inneren Gürtel wandert. Dort verteilt er sich kurioserweise nicht gleichmäßig, sondern hinterlässt Lücken, die sich mit Spitzer nun erstmals beobachten ließen.

Diese Lücken können zwei Ursachen haben: Entweder verhindern die komplizierten gravitativen Wechselwirkungen der vier Sterne eine homogene Verteilung des Staubs oder um die vier Sterne haben sich schon Planeten gebildet, die auf Kosten des inneren Gürtels stetig weiterwachsen.

Pressemitteilung des Spitzer Science Center

Künstlerische Darstellung des Vierer-Sternsystems HD 98800 und der beiden nun entdeckten Ringe mit Lücken, die von Planeten stammen könnten.

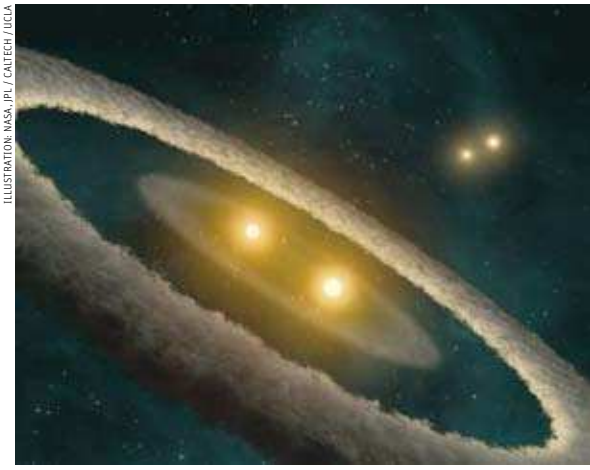
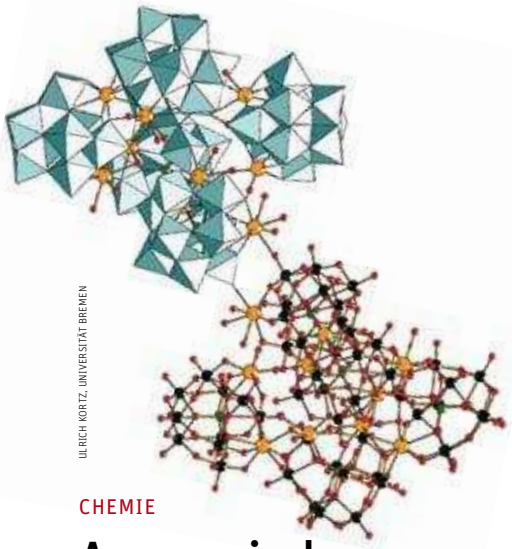


ILLUSTRATION: NASA, JPL / CALTECH / UCLA



ULRICH KORTZ, UNIVERSITÄT BREMEN

Das neue Riesenmolekül: Wolframat-Oktaeder sind hellblau, die Atome von Wolfram schwarz, von Cer orange, von Germanium grün und von Sauerstoff rot dargestellt.

CHEMIE

Anorganisches XXL-Molekül

■ Forschern an der Jacobs University Bremen ist die Synthese eines neuen Riesenmoleküls gelungen. Die aus insgesamt 600 Atomen bestehende Verbindung hat das 30 000-fache Gewicht eines einzelnen Wasserstoffatoms und einen etwa 170-mal so großen Durchmesser – damit fällt es in dieselbe Größenklasse wie kleine Viren.

Bemerkenswert ist das anorganische Molekül mit dem Namen Cerwolframatogermanat jedoch nicht nur wegen seiner Maße: Es enthält auch zwanzig Ceratome und damit die größte Menge dieses zu den »Seltenen Erden« zählenden Elements, die bisher in ein solches Molekül eingebettet werden konnte. Den Löwenanteil der zu den Polyoxometallaten gehörenden Verbindung stellen neben Sauerstoffatomen jedoch hundert Wolframatome.

»Unser neues ›Riesen-Wolframat‹ weist in einem einzigen Molekül eine Vielzahl katalytisch aktiver Zentren und somit ein extrem hohes katalytisches Potenzial auf«, erklärt der Leiter der Forschungsgruppe, Ulrich Kortz. Es sei deutlich weniger empfindlich gegen hohe Temperaturen und Sauerstoff als Enzyme und damit für den industriellen Einsatz als Katalysator prädestiniert – zumal es sich aus vergleichsweise einfachen Vorstufen unter unkomplizierten Synthesebedingungen herstellen lässt.

Laut Kortz eignen sich Polyoxometallate generell auch zur Entwicklung »molekularer Maschinen«, die dank ihrer maßgeschneiderten Struktur spezielle Aufgaben im Rahmen einer künftigen Nanotechnik erfüllen. Denkbar wäre außerdem ihr Einsatz in der Medizin – etwa bei der Bekämpfung von Virusinfektionen oder bei der Blockade viralen Erbguts.

Pressemitteilung der Jacobs University Bremen

COMPUTERTECHNIK

Chipkühlung mit Ionenwind

■ Während Mikrochips immer kleiner und leistungsfähiger werden, steigt ihre Wärmeproduktion. Herkömmliche Lüfterventilatoren könnten da schon bald an ihre Grenzen stoßen. Forscher der Purdue-Universität in West Lafayette (Indiana) ist es nun gelungen, mit mikroskopischen Ionenwinden die Kühlrate mehr als zu verdoppeln. Grundlage des Verfahrens, das ohne bewegliche Teile auskommt, ist ein elektrisches Feld, das zwischen einer auf dem Chip aufgebrachten Kathode und einer in zehn Millimeter Abstand fixierten Anode angelegt wird. Es ionisiert die Luftmoleküle zwischen den Polen, sodass sie von der negativ geladenen Kathode angesaugt werden.

Der entstehende Luftstrom diente in den Versuchen der Forscher erst einmal nur dazu, einen konventionellen Lüfter zu verstärken. Das tut er aber recht effizient. Die hohe Kühlrate beruht unter anderem darauf, dass die Ionenwinde auch die besonders heiße Schicht von Luftmolekülen austauschen, die direkt auf der Chipoberfläche haftet. Luftströme aus Ventilatoren wehen einfach darüber hinweg.

Trotzdem dürften unsere PCs vorerst weiter vor sich hin surren. Der Ionenwindgenerator muss noch auf Mikrometergröße verkleinert werden. Anschließend sind viele Exemplare auf engem Raum unterzubringen, um auch nur einen einzigen Chip zu kühlen. Nicht zuletzt stehen die benötigten Spannungen in Höhe mehrerer Kilovolt dem baldigen Einsatz entgegen.

Pressemitteilung der Purdue-Universität

Wärmeproduktion eines Computerchips: Auf dieser Falschfarben-Infrarotaufnahme steigt die Temperatur von grün über gelb nach rot und schließlich weiß.

FLIR SYSTEMS GMBH, FRANKFURT

MEDIZIN

Schwerer Knochenbau macht schlank

■ Als Ausrede für überzählige Pfunde führen beleibte Menschen gerne an, sie hätten »schwere Knochen«. Doch höchstens zwei Extra-Kilogramm lassen sich durch das Skelett erklären. Auf anderem Weg beeinflusst es dagegen wirklich das Körpergewicht, wie Forscher um Gerard Karsenty vom Medical Center der New Yorker Columbia-Universität nun nachwiesen. In einer früheren Studie hatten sie bereits gezeigt, dass ein von Fettzellen ausgeschiedenes Hormon regelt, wie viel Knochenmasse der Mensch im Lauf seines Wachstums ausbildet.

Doch gibt es auch einen Signalweg in umgekehrter Richtung? Bei ihrer Suche stießen die Forscher auf Osteocalcin, ein von Knochen bildenden Zellen im Skelett produziertes Peptid, das bisher als einfaches Strukturprotein galt. Bei genauerem Hinsehen entpuppte es sich allerdings als Hormon, das über den Insulinspiegel den Zuckerstoffwechsel und das Körpergewicht mitkontrolliert: Osteocalcin löst bei Fettzellen die Ausschüttung eines zweiten Hormons aus, das ihre Empfindlichkeit für Insulin verbessert. Gleichzeitig regt Osteocalcin die Insulinproduktion in der Bauchspeicheldrüse an.

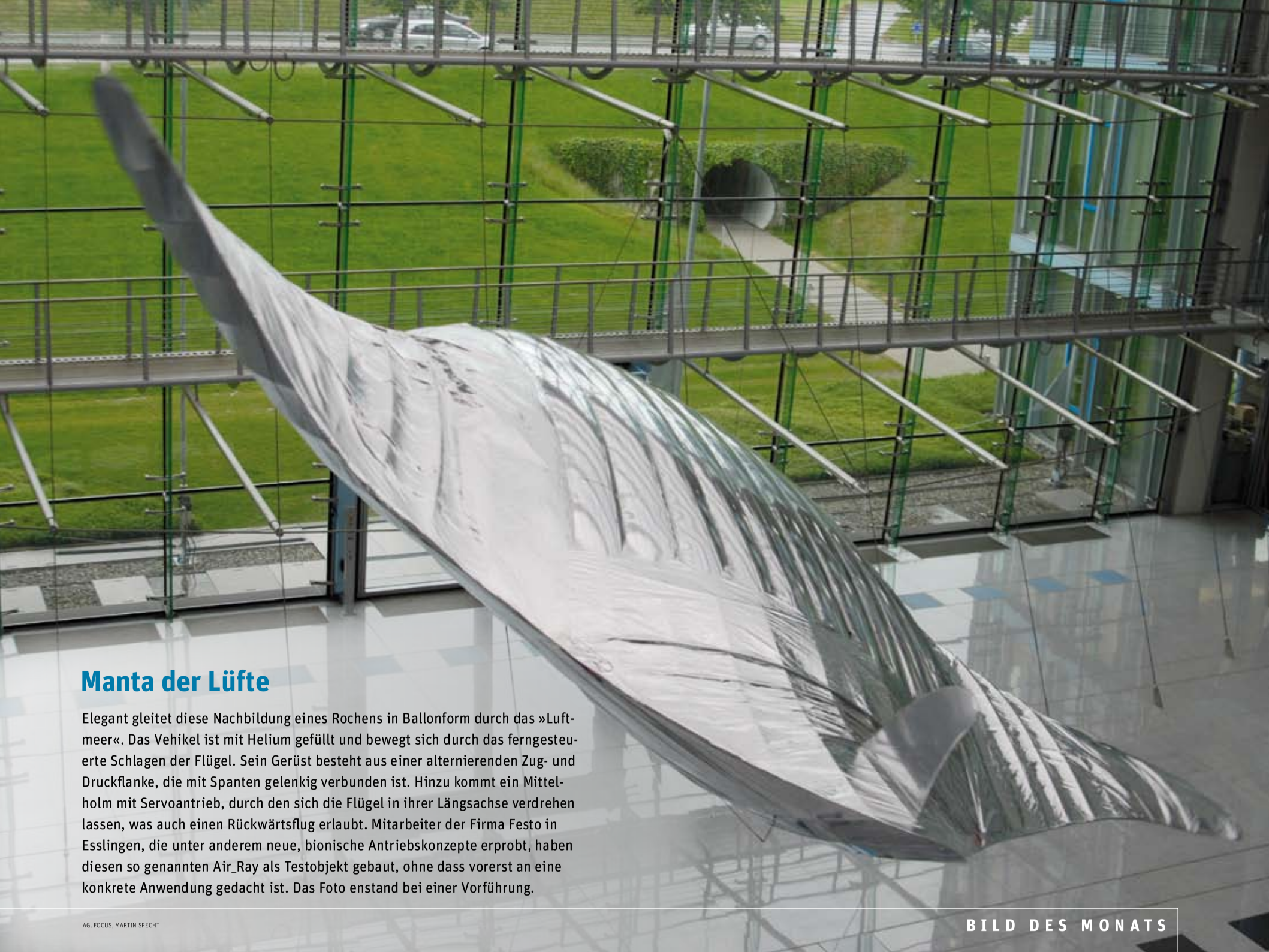
Unsere Knochen produzieren ein Hormon, das in den Zuckerstoffwechsel – hier symbolisiert durch Würfelzucker – eingreift.

KARSENTY LAB, COLUMBIA UNIVERSITY MEDICAL CENTER

Bei Mäusen ließ sich die Rolle des Hormons bereits beobachten: Tiere mit zu wenig Osteocalcin litten unter vermehrtem Körperfett, sie entwickelten Insulinmangel und sogar Typ-2-Diabetes. Ihre Artgenossen mit hohem Hormonspiegel blieben hingegen sogar dann schlank und gesund, wenn sie fettreiche Kost erhielten.

Cell, Bd. 130, S. 456

Mitarbeit: Josephina Maier und Robert Gast



Manta der Lüfte

Elegant gleitet diese Nachbildung eines Rochens in Ballonform durch das »Luftmeer«. Das Vehikel ist mit Helium gefüllt und bewegt sich durch das ferngesteuerte Schlagen der Flügel. Sein Gerüst besteht aus einer alternierenden Zug- und Druckflanke, die mit Spanten gelenkig verbunden ist. Hinzu kommt ein Mittelholm mit Servoantrieb, durch den sich die Flügel in ihrer Längsachse verdrehen lassen, was auch einen Rückwärtsflug erlaubt. Mitarbeiter der Firma Festo in Esslingen, die unter anderem neue, bionische Antriebskonzepte erprobt, haben diesen so genannten Air_Ray als Testobjekt gebaut, ohne dass vorerst an eine konkrete Anwendung gedacht ist. Das Foto enstand bei einer Vorführung.

AG. FOCUS, MARTIN SPECHT

SEHSINN Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Lichtleiter in der Netzhaut

Unsere Netzhaut ist falsch herum konstruiert: Die Sinneszellen liegen hinter den signalverarbeitenden Neuronen, die als Mattscheibe wirken. Warum können wir trotzdem gut sehen? Forscher in Leipzig fanden nun die Antwort.

Von Kristian Franze

Sehen ist einer unserer wichtigsten Sinne. Als Organ zur Wahrnehmung optischer Reize fungiert die Netzhaut oder Retina. Hochspezialisierte Sinneszellen in diesem Teil des zentralen Nervensystems, die so genannten Photorezeptoren, registrieren einfallendes Licht und wandeln die optischen in chemische Signale um. Diese Information wird dann von benachbarten Nervenzellen in der Retina weiterverarbeitet, bevor sie schließlich über den optischen Nerv ins Gehirn gelangt.

Aus entwicklungsbiologischen Gründen befinden sich die Photorezeptoren bei allen Wirbeltieren – anders als bei Wirbellosen wie dem Tintenfisch – auf der hinteren Seite der Netzhaut. Durchs Auge einfallendes Licht muss deshalb erst mehrere Schichten unterschiedlicher Neuronentypen durchdringen, bevor es zu den Sinneszellen gelangt und diese erregen kann. Deren Signale werden dann entgegen dem einfallenden Licht an die nachgeschalteten Neurone »zurück«geleitet, bis sie schließlich die so genannten Ganglienzellen erreichen, deren Fasern (Axone) an der lichtzugewandten Netzhautoberfläche entlangziehen und sich im optischen Nerv vereinen.

Ins Auge einfallendes Licht gelangt, fokussiert von der Linse, durch den Glaskörper zur inneren Oberfläche der Netzhaut. Dort sorgen, wie neueste Untersuchungen ergaben, lang gestreckte Müllerzellen für die Weiterleitung zu den Photorezeptoren – vorbei an den Licht streuenden Elementen der inneren Retina. Dadurch werden Lichtausbeute und Bildqualität optimiert.

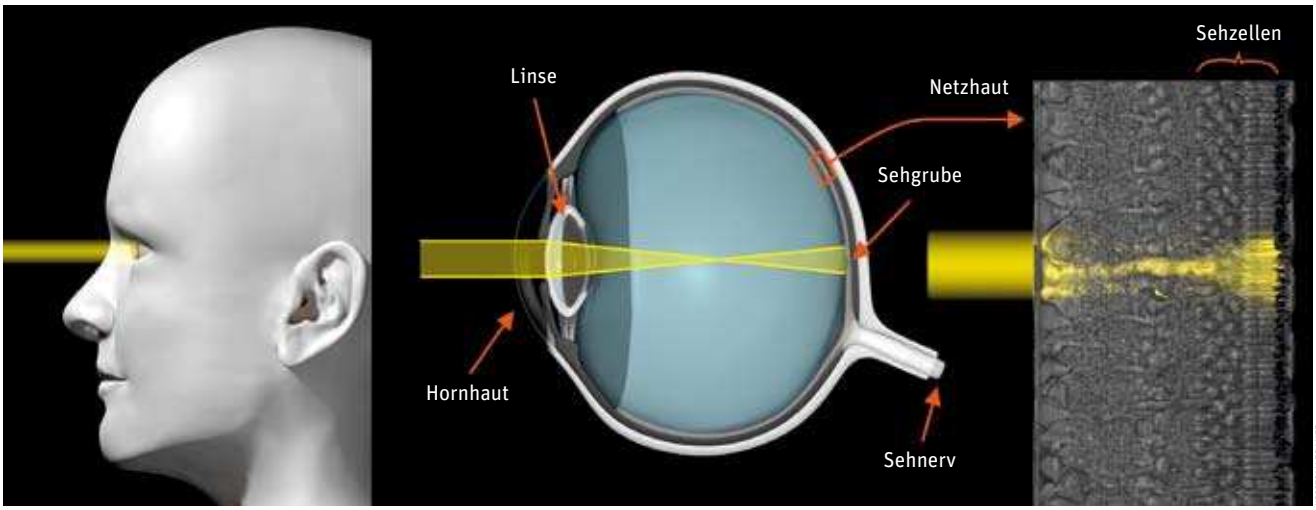
Wie wir trotz dieses invertierten Aufbaus der Netzhaut scharf sehen können, ist Forschern schon seit Jahrzehnten ein Rätsel. Timothy H. Goldsmith von der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) verglich die Situation einmal mit dem Einbau einer Mattscheibe vor dem Film in einer Kamera. Und Hermann von Helmholtz erklärte schon im 19. Jahrhundert: Wenn ein Optiker ihm ein Instrument anbiete, das all die Defekte eines menschlichen Auges aufweise, würde er es unter Protest zurückweisen.

Zwar sind die neuronalen Netzhautschichten vor den Photorezeptoren insgesamt nur etwa ein zehntel Millimeter dick. Doch variieren die sie aufbauenden Zellen stark in Form und optischen Eigenschaften wie dem Brechungsindex. Zudem liegt die Größe neuronaler Fortsätze und Synapsen, aus denen bestimmte Netzhautschichten bestehen, im Bereich der Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Nach den Gesetzen der Optik müsste das zu Brechung, Streuung und Reflexion der Lichtstrahlen auf ihrem Weg durch die innere Retina zu den Photorezeptoren führen, wodurch sich räumliche Auflösung wie Lichtausbeute drastisch verschlechtern – zu Lasten der Bildqualität.

Die Sehgrube als Notbehelf

Einen Beweis für den störenden Effekt der inneren Netzhautschichten liefert die Natur selbst. In der Retina von höheren Primaten einschließlich des Menschen gibt es einen Bereich maximaler Sehschärfe. Diese Fovea centralis oder Sehgrube enthält dicht gepackt besonders viele Sinneszellen. Zugleich sind die davorliegenden Schichten der inneren Netzhaut zur Seite geschoben, wodurch das Licht dort mehr oder weniger direkt auf die Photorezeptoren fallen kann.

Dieses nachträgliche Verschieben komplex vernetzter Zellverbände, das



beim Menschen in der Zeit vom späten Fötalstadium bis etwa zum vierten Lebensjahr stattfindet, ist nur räumlich begrenzt möglich und mit großem Aufwand verbunden. Deshalb stellt es einen entwicklungsbiologischen Extremfall dar, der unter den Säugern ausschließlich bei den höheren Primaten vorkommt.

Trotz der invertierten Netzhaut können die meisten Wirbeltiere allerdings erstaunlich gut sehen. Um die Klärung dieses Widerspruchs bemühte sich das Graduiertenkolleg »Interneuro« an der Universität Leipzig, ein Kooperationsprojekt der Arbeitsgruppen um den Physiker Jochen Guck und den Neurophysiologen Andreas Reichenbach, an dem ich im Rahmen meiner Doktorarbeit mitgewirkt habe.

Als Erstes wollten wir wissen, was mit dem Licht auf dem Weg durch die innere Netzhaut passiert. Mit Hilfe einer modifizierten Mikroskopiertechnik konnten wir beobachten, dass die Strahlung nicht gleichmäßig durch die Retina tritt: Auf der lichtabgewandten Seite waren viele kleine helle Flecken umgeben von dunkleren Bereichen zu erkennen. Es schien also Regionen in der Netzhaut zu geben, die mehr Licht durchlassen als andere.

Als wir anschließend mit Hilfe eines so genannten konfokalen Laser-Raster-Mikroskops die Reflexion im Inneren der Retina in verschiedenen Tiefen näher betrachteten, fiel auf, dass auch sie ungleichmäßig ist: Wo auf der lichtabgewandten Seite dunkle Flecken waren, warf das Netzhautgewebe deutlich mehr Licht zurück. Besonders stark reflektierten diejenigen Schichten, die überwiegend aus Nervenzellfortsätzen und Synapsen bestehen.

Interessanterweise erkannten wir bei unserer Untersuchung auch, dass sich die besonders lichtdurchlässigen Bereiche schlauchförmig quer durch die Netzhaut ziehen. Durch Anfärben von Proteinen, die jeweils für einen bestimmten Zelltyp spezifisch sind, konnten wir diese lichtdurchlässigen Strukturen schließlich identifizieren.

Demnach handelt es sich um Müllerzellen, die nach den Neuronen die zweithäufigste Komponente der Netzhaut bilden. Als Einzige durchspannen sie die gesamte Retina, verbinden also Vorder- und Rückseite. Sie haben die Form eines länglichen Zylinders und weiten sich zum Augeninneren hin trichterförmig auf, sodass sie die vordere Netzhautoberfläche vollständig bedecken. Dadurch trifft jedes Photon, das an der Retina ankommt, unausweichlich auf eine Müllerzelle. All das brachte uns zu der Vermutung, dass es sich bei diesen zylinderförmigen Strukturen um Lichtleiter handeln könnte.

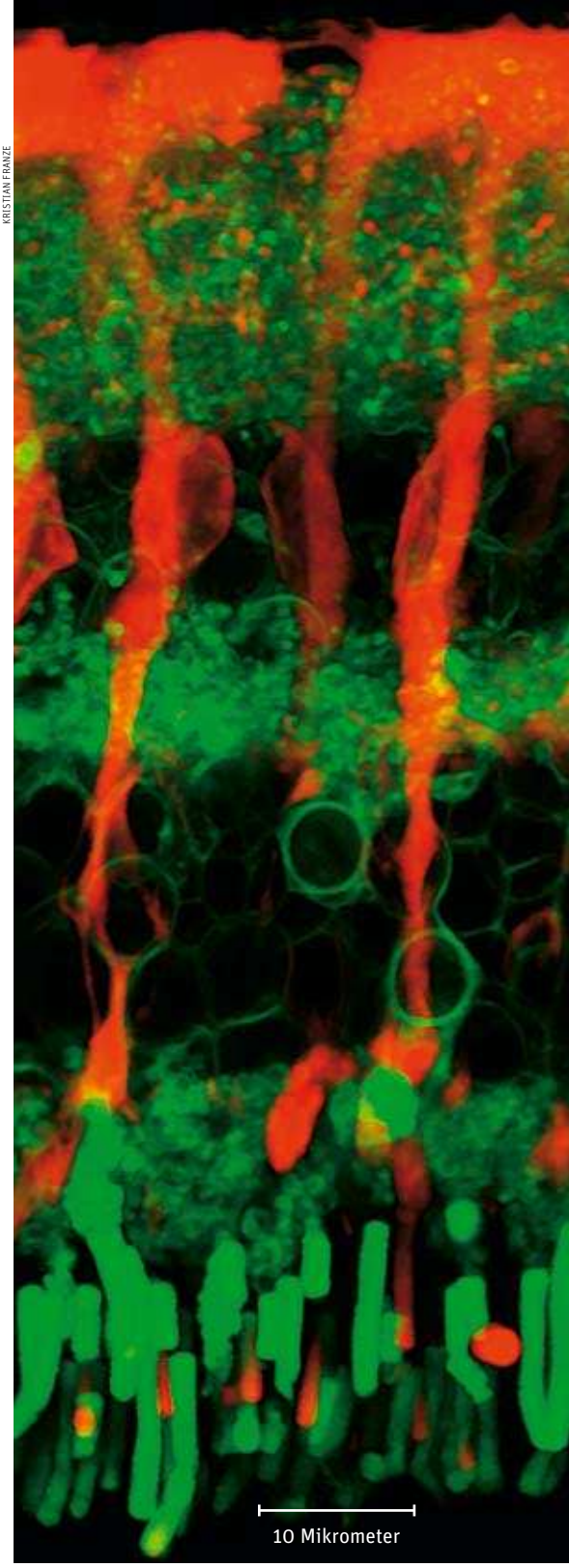
Klassische Lichtleiter müssen einen relativ hohen Brechungsindex haben, damit Strahlen an ihrem Rand ins Innere zurückgelenkt werden. Wie verhält es sich in dieser Hinsicht mit den Müllerzellen? Tatsächlich übertrifft ihr Brechungsindex, wie wir feststellten, den aller anderen Zelltypen in der Netzhaut. Somit erfüllen sie eine der wichtigsten Voraussetzungen, um wie optische Fasern Strahlung leiten zu können.

Nachweis mit optischen Zangen

Zum Beweis dieser Leitfähigkeit mussten wir die Transmission von Licht durch eine einzelne Müllerzelle messen. Das größte Problem dabei war die genaue Positionierung und Ausrichtung des Untersuchungsobjekts. Wir benutzten dazu »optische Zangen« in Form von Infrarotlaserstrahlen, die aus zwei gegenüberliegenden Glasfasern austraten. Sie sorgten dafür, dass sich die Müllerzelle in Längsrichtung zwischen ihnen anordnete. Dann schickten wir durch eine der Fasern zusätzlich einen sichtbaren Lichtstrahl und maßen, wie viel davon bei der anderen ankommt. Das Ergebnis bestätigte unsere Erwartungen: Die Müllerzelle leitete das Licht fast verlustlos von einem Ende zum anderen. Blieb der Platz zwischen den Glasfasern leer, ging wesentlich mehr Strahlung durch die Divergenz des Lasers verloren.

Schließlich verglichen wir die Transmission der Netzhaut mit derjenigen einer faseroptischen Platte aus Tausenden parallel angeordneter Lichtleiter. Beide übermitteln, wie sich zeigte, Bilder in ähnlich guter Qualität. Während die zylinderförmigen Lichtleiter bei dem faseroptischen Imitat überall den gleichen Durchmesser und Brechungsindex haben, erweitern sich die Müllerzellen allerdings trichterförmig zum Glaskörper des Auges hin. Parallel dazu nimmt der Brechungsindex graduell ab. Beides sorgt für eine wesentlich bessere optische Ankopplung der Retina an den Glaskörper.

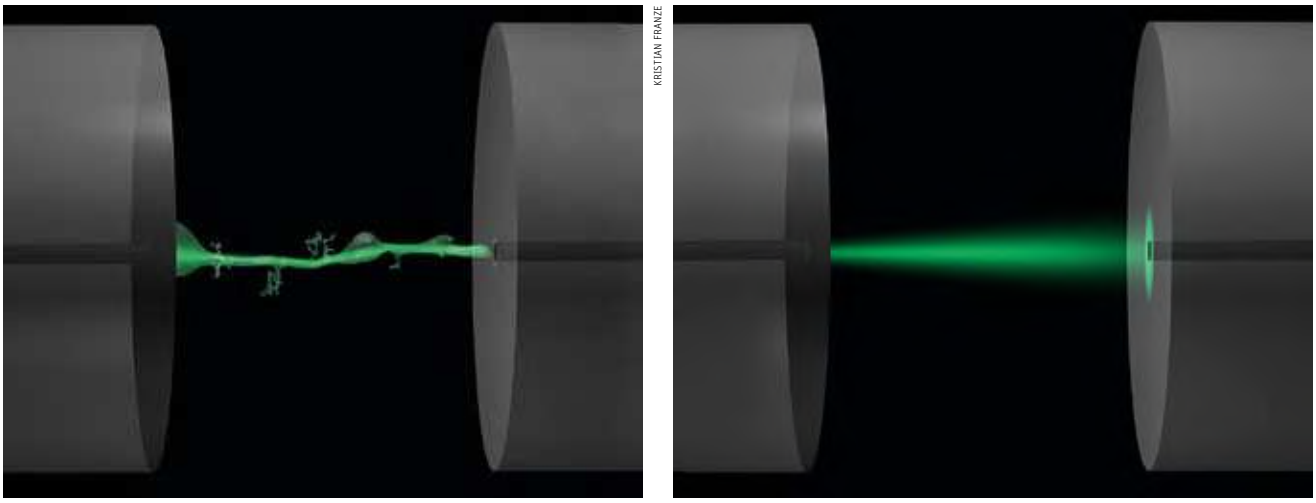
Die Müllerzellen ermöglichen also nicht nur einen verlustarmen Lichttransfer zu den Photorezeptoren – vorbei an den streuenden Strukturen in den inne-



KRISTIAN FRANZE

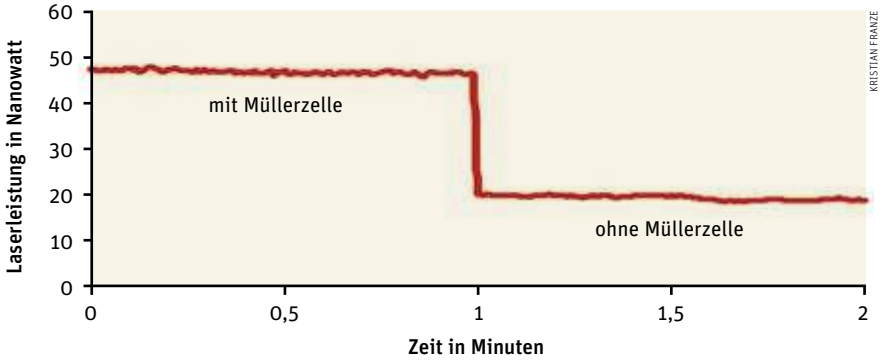
Wie auf diesem angefärbten Querschnitt durch eine Netzhaut zu sehen ist, ziehen von der inneren Retinaseite (oben), auf die das Licht fällt, Müllerzellen (rot) zu den stäbchenförmigen Photorezeptoren (grün, unten). Ihre Kerne liegen zwischen zwei »plexiformen« Schichten (grün gesprenkelt), die hauptsächtlich aus neuronalen Fortsätzen und Synapsen bestehen. Darunter befinden sich die Zellkerne (grüne Bläschen) der Photorezeptoren.

SdW ABO



KRISTIAN FRANZE

Eine Müllerzelle, die mit Hilfe zweier unsichtbarer Infrarotstrahlen zwischen zwei Glasfasern gefangen wurde (oben links), überträgt einen grünen Laserstrahl fast verlustlos (unten). Fehlt sie, geht ein großer Teil des Lichts verloren, weil der Strahl divergiert (oben rechts).



KRISTIAN FRANZE

ren Schichten der Netzhaut –, sondern optimieren auch den Übertritt des Lichts von den transparenten Medien des Auges in den eigentlichen Detektor.

Völlig zu Recht relativierte also Helmholtz, obwohl er die Details gar nicht wissen konnte, seine erste, negative Aussage, indem er fortfuhr: »Trotzdem bin ich froh, meine Augen zu haben, und ich würde sie nicht eintauschen wollen«.

Kristian Franze hat nach dem Studium der Veterinärmedizin in Leipzig über die Mechanik des zentralen Nervensystems und speziell die Optik der Netzhaut promoviert. Ab Oktober forscht er an der Universität Cambridge (England).

INTERVIEW ZUR EVOLUTION DES MENSCHEN

»Unser Stammbaum ist in Wirklichkeit ein Stammbusch«

Bisher galt der *Homo habilis*, der »geschickte Mensch«, als Vorfahr des *Homo erectus*, des »aufgerichteten Menschen«. Doch ein internationales Forscherteam um die bekannte Paläoanthropologin Meave G. Leakey schließt nun aus zwei Fossilien von Ileret, einem Ort im Osten des Turkanasees in Kenia, dass die beiden Vormenschenarten fast eine halbe Million Jahre lang nebeneinander existierten *(Nature, Bd. 448, S. 688)*.

Das eine Fossil ist ein gut erhaltener Schädel eines *Homo erectus*, der vor rund 1,55 Millionen Jahren lebte, das andere ein halber Oberkiefer mit Zähnen und weiteren anhaftenden Knochenpartien von einem *Homo habilis*, dessen Alter nur etwa 1,44 Millionen Jahre beträgt. Aus so später Zeit gab es bisher keine Funde dieses Hominiden, dessen bekannteste Fossilien – von Meave Leakeys Schwiegervater Louis in den frühen 1960er Jahren entdeckt und als Überreste von Frühmenschen interpretiert – rund zwei Millionen Jahre alt sind.

Der Paläoanthropologe Friedemann Schrenk vom Senckenberg-Museum in Frankfurt bewertet die neuen Ergebnisse.

Spektrum der Wissenschaft: Überrascht Sie die Erkenntnis, dass der *Homo habilis* nicht der Vorläufer, sondern ein Zeitgenosse des *Homo erectus* war?

Prof. Dr. Friedemann Schrenk: Nein, dieser Befund zeigt nur wieder einmal, dass unser Stammbaum in Wirklichkeit ein Stammbusch ist – dass mehrere Arten oder geografische Varianten nebeneinander gelebt haben. Das ist in der Biologie völlig normal und auch beim Kulturwesen *Homo sapiens* erst seit knapp 600 Generationen nicht mehr der Fall. Uns erscheint das als Ewigkeit. In geolo-

NOEMI BACHMANN

Friedemann Schrenk ist Professor für die Paläobiologie der Wirbeltiere an der Universität Frankfurt/Main und leitet am Forschungsinstitut und Naturmuseum Senckenberg die Abteilung Paläoanthropologie. Er arbeitet oft in Ostafrika, unter anderem in Malawi. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehört die Abstammung der Gattung *Homo*.

gischen, evolutiven oder meinetwegen auch göttlichen Zeiträumen aber ist es ein Nichts.

Spektrum: Und wo ist der *Homo habilis* nun einzuordnen?

Schrenk: Den halte ich ohnehin schon lange für eine Sackgasse. Ich würde ihn lieber zu den Vormenschen rechnen. Er müsste eigentlich *Australopithecus habilis* heißen.

Spektrum: Angeblich gab es auch bei vorher bekannten Fossilien von *Homo habilis* und *erectus* schon eine zeitliche Überlappung, wenn auch nicht ganz so lang.

Schrenk: Selbstverständlich, wir hatten schon von beiden Arten Fossilien, die in die gleiche Zeit gehören. Zum Beispiel sind Reste des *Homo erectus* aus Westturkana in Kenia 1,9 Millionen Jahre alt, solche von *Homo habilis* aus der Olduvai-Schlucht in Tansania aber nur 1,7 Millionen. Wie gesagt, war es während der Evolution der Hominiden eher die Regel als die Ausnahme, dass mehrere Arten gleichzeitig lebten. Alles andere wäre auch biologisch überhaupt nicht erklärbar; Lebewesen existieren ja nicht chronologisch als Zeitlinien, wie sie manchmal dargestellt werden, sondern in geografisch unterschiedlichen Lebensräumen, die gleichzeitig nebeneinander bestehen. Die Koexistenz der Gattung *Homo* mit den robusten Australopithecinen dauerte sogar mehr als 1,5 Millionen Jahre.

Spektrum: Woher kommt dann aber der *Homo erectus*, also der direkte Vorläufer des *Homo sapiens*?

Schrenk: Die neuen Funde bestätigen eigentlich nur, was vielen Paläoanthropologen längst schon klar war: Die geologisch älteste Art der Gattung *Homo* ist *Homo rudolfensis*. Der erschien vor rund 2,5 Millionen Jahren. *Erectus* und *habilis* tauchten beide mehr oder weniger gleichzeitig vor knapp zwei Millionen Jahren auf. Schon deshalb kann *Homo erectus* gar nicht von *Homo habilis* abstammen.

Allerdings zählen die Autoren der neuen Veröffentlichung *Homo rudolfensis* zu *Homo habilis*. Ich bin da völlig anderer Meinung. Meine Arbeitsgruppe hat schon vor Langem die These aufgestellt, dass der *Homo erectus* vom *Homo rudolfensis* abstammt und dieser von Vormenschen im östlichen Afrika. *Homo habilis* leitet sich dagegen von *Australopithecus africanus* ab – also von Vormenschen des südlichen Afrika, die vor zirka 2,5 Millionen Jahren im Zuge klimatischer Abkühlungstendenzen äquatorwärts zogen. Das haben wir mit biogeografischen und Umweltstudien begründet. Die Skelettmerkmale passen auch dazu. Ich halte das immer noch für sehr plausibel.

Spektrum: Warum und wie ist die Gattung *Homo* aber nun entstanden?

Schrenk: Der Ursprung der Gattung *Homo* ist verknüpft mit dem Beginn der kulturellen Evolution, das heißt vor allem der Nutzung der ersten Steinwerkzeuge vor 2,5 Millionen Jahren. Das war ausgelöst durch Klimaänderungen, die zu ungewöhnlich hartfasriger und hartschaliger Nahrung führten. Diese wurde mit den ersten Steinwerkzeugen besser zugänglich.

Gleichzeitig entstanden übrigens die ersten robusten Australopithecinen, quasi die Nussknackermenschen. Sie lösten das Problem der harten Nahrung mit Hilfe stärkerer Kaumuskulatur und riesigen Zähnen. Langfristig war die kulturelle Lösung allerdings überlegen, denn die robusten Australopithecinen starben vor etwa einer Million Jahren aus. Zu diesem Zeitpunkt hatte der *Homo erectus* die anfänglichen Hammersteine längst zu Schneidewerkzeugen weiterentwickelt, die auch die Verarbeitung von fleischlicher Nahrung erleichterten.

Spektrum: Die Autoren des »Nature«-Beitrags vermuten, dass *Homo habilis* und *Homo erectus* in Ostafrika nur nebeneinander leben konnten, weil sie verschiedene ökologische Nischen besetzten. Was meinen Sie dazu?

Schrenk: Der Hauptunterschied bestand meines Erachtens im Verhalten und in der Weiterentwicklung der kulturellen Fähigkeiten. Der *Homo habilis* konnte mit rudimentären Steinwerkzeugen immerhin schon einige Schritte der Nahrungszerkleinerung nach außerhalb des Körpers verlagern. Doch die Fähigkeiten des *Homo erectus* reichten viel weiter. Er besaß eine noch nie da gewesene Flexibilität, von differenzierten Werkzeugen bis hin zu vorausschauendem Bewusstsein. Er benutzte zum Beispiel Feuer. Mit diesen Fähigkeiten erschloss er sich eine völlig neue Welt. Er konnte sich wesentlich vielseitiger ernähren und in ganz andere Lebensräume vordringen. Durch entsprechende Rückkopplungsprozesse wurde so auch die Vergrößerung des Gehirns angeregt.

Wichtig ist mir in dem Zusammenhang, dass man zum Einordnen und Bewerten solcher Fossilfunde viel mehr braucht als die rein anatomischen Daten. Die Fundlage ist auf unserem Gebiet so dünn, da gibt es kein richtig oder falsch, sondern nur wahrscheinlich und unwahrscheinlich im Sinn einer Hypothese. Wir müssen deshalb interdisziplinär arbeiten und sehr vieles einbeziehen. Dazu gehören Veränderungen der Umwelt, der Lebensräume, der Nahrungsgrundlagen, der kulturellen Evolution, der biogeografischen Zusammenhänge und vieles mehr.

Die Fragen stellte **Adelheid Stahnke,** Redakteurin bei Spektrum der Wissenschaft.

ARCHÄOLOGIE

Mannheims vergessene Mumien

Eine kürzlich wieder aufgetauchte Mumiensammlung an den Reiss-Engelhorn-Museen in Mannheim wurde in einem internationalen Projekt eingehend untersucht – mit teils verblüffenden Ergebnissen.

Diese Mumie eines jungen Mannes aus den Beständen der Reiss-Engelhorn-Museen in Mannheim stammt, wie genetische Tests ergaben, aus Nordostasien.

Von Wilfried Rosendahl

Es war eine kleine Sensation: Bei Umstrukturierungen in den Depots der Reiss-Engelhorn-Museen in Mannheim im Frühjahr 2004 wurden zwanzig vollständig oder teilweise erhaltene Mumien unterschiedlicher Herkunft »wiederentdeckt«, die noch niemals ausgestellt waren. Die Inventarbücher gaben kaum Auskunft über die Objekte, teils stand dort sogar der Vermerk »Kriegsverlust«. Nur von einigen Leichnamen aus Altamerika war bekannt, dass sie aus dem ehemaligen Besitz des Münchner Sammlers und Kunstmalers Ritter Gabriel von Max stammten und zu Beginn des 20. Jahrhunderts mit zahlreichen anderen Beständen nach Mannheim gekommen waren. Bei den meisten anderen Objekten fehlten nähere Informationen.

Der unerwartete Fund gab den Sammlungsleitern und Restauratoren also einige Rätsel auf. Aus welchem Kulturkreis stammen die Mumien? Welches Geschlecht haben sie? Woran sind sie gestorben? Wie wurden sie mumifiziert? Diese und noch mehr Geheimnisse galt es zu lüften.

Schon nach der ersten Begutachtung stand fest, dass die Behandlung und künftige Aufbewahrung der Mumien den ethischen Richtlinien der internatio-

Werte schaffen durch Innovation

Auch nach 120 Jahren an Erfahrung sind wir immer noch ausgesprochen neugierig - für unsere kommenden Generationen.

Boehringer Ingelheim hat sich seit 1885 bis heute in einem globalen Markt seinen Charakter als ein unabhängiges Familienunternehmen bewahrt. Forschung ist unsere treibende Kraft, die von vielen Forschungszentren rund um den Globus ausgeht. Als Pharmaunternehmen setzen wir Erfolg gleich mit der kontinuierlichen Einführung von therapeutischen Innovationen. Mit mehr als 38.400 Mitarbeitern weltweit, davon alleine über 10.000 in Deutschland, arbeiten wir daran, die Aussichten auf ein gesünderes Leben Realität werden zu lassen.

www.boehringer-ingelheim.de

Boehringer Ingelheim

nalen Museumsgemeinschaft (ICOM) entsprechen sollte. Um die Objekte zu schonen und zu erreichen, dass sie nicht zu einem späteren Zeitpunkt wieder bewegt werden müssten, beschlossen die Verantwortlichen, parallel zur Restaurierung ein wissenschaftliches Untersuchungsprogramm durchzuführen. Es sollte helfen, die Informationslücken zu schließen und zugleich die optimale Aufbewahrungsmöglichkeit für die einzelnen Mumien zu finden.

Den Reiss-Engelhorn-Museen gelang es, renommierte Wissenschaftler aus dem In- und Ausland für dieses Projekt zu gewinnen – darunter Frank Rühli von der Universität Zürich, der in den vergangenen Jahren auch an den Untersuchungen von Tutanchamun und Ötzi beteiligt war (siehe Spektrum der Wissenschaft 5/2005, S. 16). Anthropologen, Anatomen, Mediziner, Chemiker, Physiker, Biologen, Genetiker und Spezialisten anderer Bereiche arbeiten seit nunmehr drei Jahren bei diesem Projekt Hand in Hand. Nur mit einem solchen interdisziplinären Ansatz gelang es, den Mumien einen Großteil ihrer Geheimnisse zu entlocken.

Oberste Maxime war, die Untersuchungen respektvoll und möglichst schonend für die Objekte durchzuführen. Für die Radiokarbondatierungen und molekulargenetischen Tests wurden winzige Knochen- oder Gewebeproben entnommen. Zur Analyse auf Drogen und die Isotopenverhältnisse im Keratin dienten wenige kurze Haarstücke.

Kein Kokain, nur Nikotin

Unter anderem sollten Mumien aus Altamerika Aufschluss darüber geben, ob die Indios damals regelmäßig Kokain konsumierten. Am Institut für Rechtsmedizin der Universität Bonn ließen sich jedoch keine Spuren der Droge finden. Stattdessen zeigten sich bei den Haaranalysen Nikotinreste, deren hohe Konzentration auf aktive Konsumenten und nicht bloß passiv exponierte Mitraucher hindeutete.

Sehr interessante Aufschlüsse über die Essgewohnheiten ergaben Isotopenanalysen, die Wissenschaftler der Universität Tübingen an den präkolumbischen Mumien durchführten. Hierbei ermittelten die Forscher im Keratin der Haare den Anteil der schweren Atomsorten Stickstoff-15 und Kohlenstoff-13 gegenüber den leichten Isotopen ^{14}N und ^{12}C. Er erlaubt Rückschlüsse auf die Ernährung. Demnach verzehrte ein Teil der Menschen nur Meerestiere, ein anderer dagegen ausschließlich Feldfrüchte wie Mais. Letzteres bestätigte auch der Zahnabrieb, der bei den betreffenden Mumien in computertomografischen Aufnahmen gut zu erkennen war.

Solche CT-Untersuchungen am Uniklinikum Mainz enthüllten viele weitere Details zum Leben und Leiden der Menschen. So zeigte sich bei einer Mumie von der Küste Mittelperus, einer Frau aus der präkolumbischen Chancy-Kultur, ein schwerer Defekt im Übergangsbereich zwischen Brust- und Lendenwirbelsäule: Der 11. Brustwirbelkörper ist fast völlig aufgelöst. Wahrscheinlich erlitt die Frau eine Querschnittlähmung, weil das Rückenmark durch eine fortschreitende Entzündung und das Zusammenbrechen der betroffenen Wirbelkörper zerstört wurde. Diese schwere Erkrankung war wohl auch die Todesursache.

Molekulargenetische Untersuchungen, die gleichfalls an der Universität Mainz durchgeführt wurden, sollten die Herkunft einiger Mumien klären helfen. Obwohl die DNA-Analysen nur in wenigen Fällen erfolgreich verliefen, waren die Ergebnisse teils überraschend. So zeigte sich, dass die gut erhaltene Ganzkörpermumie eines jungen Manns, die ihrer äußeren Erscheinung nach ägyptisch wirkte, in Wirklichkeit aus Nordostasien stammt (siehe Foto S. 21).

Die vielleicht erstaunlichste Erkenntnis lieferte die Untersuchung der Hautoberfläche einer peruanischen Kindermumie (links) aus dem 14. Jahrhundert an der Fachhochschule Köln. Unter ultraviolettem Licht zeigten sich an mehreren Stellen orange leuchtende Flecken, die bei normaler Beleuchtung als teils schollenartig abplatzende Paste oder blassgelbe Farbschicht erschienen.

Auf der Hautoberfläche dieser Kindermumie aus Peru ließen sich harzige Balsamierungssubstanzen nachweisen – erster Beleg für eine künstliche Konservierung von Toten in der neuen Welt.

JEAN CHRISTEN, REISS-ENGELHORN-MUSEEN MANNHEIM

Eine präkolumbische Frauenmumie aus den Beständen der Reiss-Engelhorn-Museen in Mannheim wird im Computertomografen durchleuchtet.

WILFRIED ROSENDAHL, REISS-ENGELHORN-MUSEEN MANNHEIM

Zur Klärung der Zusammensetzung wurde eine Probe mit einem speziellen Verfahren der Infrarot-Spektroskopie untersucht. Das Ergebnis war verblüffend. Demnach hatte die Substanz sehr große Ähnlichkeit mit einem pflanzlichen Naturharz, das in Südamerika vorkommt. Das kann nur eines bedeuten: Bei dem Belag handelt es sich um Überreste eines harzigen Balsams, mit dem ursprünglich die gesamte Körperoberfläche eingerieben war. Damit ließ sich erstmals nachweisen, dass präkolumbische Mumien ähnlich wie diejenigen in Altägypten durch Einbalsamierung künstlich konserviert wurden.

Beim Mumienprojekt der Reiss-Engelhorn-Museen kommen auch Methoden zum Einsatz, die bisher nur aus anderen Gebieten bekannt sind. Dazu zählt etwa das Rapid Prototyping, ein technisches Verfahren zur schnellen Herstellung von Musterbauteilen. Mit ihm wur-

ANZEIGE

Konzentrierter.
Belastbarer.
Ausgeglichener.

Aktivieren Sie Ihre Kraftwerke der Konzentration.
Konzentration ist Ihre Eintrittskarte zu geistiger Fitness – und die können Sie stärken und zur Höchstform bringen. Ihr Gehirn hat das Potenzial, ein Leben lang konzentriert und geistig aktiv zu sein. Die Energie dazu liefern Ihnen Ihre 100 Milliarden Gehirnzellen. Aktivieren Sie Ihre Gehirnzellen – mit Tebonin®.

Tebonin®
Mehr Energie für das Gehirn.
Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit.

Stärkt Gedächtnisleistung und Konzentration.

Ginkgo-Spezialextrakt EGb 761®
- Pflanzlicher Wirkstoff
- Gut verträglich

Mit der Natur.
Für die Menschen.
Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel
www.tebonin.de

Tebonin® intens 120 mg Wirkstoff: Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei hirnorganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (dementielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Hinweise: Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. **Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel, Karlsruhe.** Stand: Juli 2007 T/07/07/1

de am Forschungszentum Caesar (Center of Advanced European Studies and Research) in Bonn auf der Basis von computertomografischen Daten der Schädel der bereits erwähnten präkolumbischen Kindermumie per Laser aus einem flüssigen, lichtempfindlichen Kunststoff rekonstruiert. Auf diese Weise ließ sich eine speziell an die Körperanatomie angepasste Kopfstütze herstellen, die eine optimale Aufbewahrung und Präsentation des Leichnams gewährleistet.

Gleichfalls am Forschungszentrum Caesar wurden von zwei Mumienköpfen probeweise Hologramme erstellt. Das Ziel sind real wirkende dreidimensionale Ansichten solcher Objekte, die aus konservatorischen Gründen nicht in einer Ausstellung gezeigt werden können.

Der Traum vom ewigen Leben

Unter der Schirmherrschaft von Annette Schavan, Bundesministerin für Bildung und Forschung, präsentiert eine große Sonderausstellung der Reiss-Engelhorn-Museen mit dem Titel »Mumien – Der Traum vom ewigen Leben« nun erstmals die bisherigen Forschungsergebnisse in multimedialer Aufarbeitung einer breiten Öffentlichkeit (30. 9. 2007 bis 24. 3. 2008). Dazu ist ein umfangreicher gleichnamiger Katalog im Mainzer Verlag Philipp von Zabern erschienen. Gezeigt werden neben den Mannheimer Mumien auch zahlreiche Leihgaben aus Europa und Übersee.

Eigentlich sollte das Mumienforschungsprojekt mit Beginn der Ausstellung beendet sein. Seit 2004 haben sich die Reiss-Engelhorn-Museen jedoch als Zentrum der Mumienforschung etabliert. Deshalb werden die Untersuchungen, unter anderem gefördert durch die großzügige Schenkung eines modernen Computertomografen von der Siemens AG, auch während und nach der Sonderausstellung weitergehen.

Mehrere Leihgeber haben bereits Interesse bekundet, ihre Mumien durch das erprobte Forscherteam untersuchen zu lassen. Außerdem sind die Reiss-Engelhorn-Museen mittlerweile Kooperationspartner anderer großer Mumienprojekte wie dem »Swiss-Mummy-Project« der Universität Zürich.

Wilfried Rosendahl ist promovierter Geoarchäologe und Sammlungsleiter an den Reiss-Engelhorn-Museen in Mannheim. Ihm unterstand auch das geschilderte Mumienforschungsprojekt.

Springers Einwürfe

Prost Mahlzeit!

Wie man beim Tafeln richtig liegt

Wenn man dem Fernsehen Glauben schenkt, erklimmt unsere Esskultur atemberaubende Höhen. In allen Kanälen sind mit Schürze und weißem Pilzhut kostümierte Köche am Werk. Vor den lüsternen Augen der Kamera bereiten sie in laborähnlichem Ambiente Gerichte zu, von denen ein Amateuresser wie ich noch nie gehört hat. Meist soll ein prominenter Topfgucker als Studiogast für Stimmung sorgen; er darf aber nur niedere Tätigkeiten wie Kleinschneiden, Umrühren und Entkorken ausführen. Am Ende kosten Koch und Promi einträchtig von der edlen Speise und machen »Mmm«.

Ich frage Sie: Das soll Esskultur sein? Man sieht die TV-Gourmets ewig lange kochen, dann nehmen sie im Stehen einen Bissen, und das war's. Wo bleibt da die Kunst des Essens? Sollen wir etwa nach dem Fernsehvorbild stundenlang in einer aseptischen Blechküche mit Hightechgerät hantieren, nur um am Ende für den eigentlichen Genuss keine Zeit mehr zu haben?

Das war früher anders, versichern Kulturhistoriker. Rund ums Mittelmeer wurden im Altertum ausgiebige Gelage zelebriert – und zwar, wie schon der Name sagt, im Liegen. Laufendes Konsumieren von Pausensnacks und Trinken aus Wegwerfbechern wäre zumindest der wohlhabenden Oberschicht von damals als pure Barbarei erschienen. Dafür sprechen unzählige bildliche Darstellungen, Reliefs und Skulpturen, die den Essgenuss von Tafelnden mit aufgestütztem Ellbogen und hochgelagerten Beinen feiern.

An diesen Bildern ist zwei italienischen Forschern – als Nachfahren der alten Römer für das Thema Orgien offenbar prädestiniert – etwas Interessantes aufgefallen. Der Medizinhistoriker Paolo Mazzarello und der Etruskologe Maurizio Harari von der Universität Pavia stellen fest: Auf den mehr als 700 Exemplaren, die aus dem 7. bis 4. vorchristlichen Jahrhundert bekannt sind, liegen die Schlemmer ausnahmslos auf der linken Seite *(Nature, Bd. 448, S. 753)*.

Das lässt sich nicht mit dem billigen Argument erklären, dass liegende Esser und Trinker sich lieber links aufstützen, um rechts zugreifen zu können – denn auch in der Antike muss es ein paar Linkshänder wie mich gegeben haben. Die zwei Forscher liefern darum eine anatomische Begründung. Bei uns Menschen liegt der Magen nicht symmetrisch zur Körperachse, sondern eher auf der linken Seite, außerdem seitlich gekrümmt wie ein Dudelsack oder Weinschlauch.

Darum hat es Vorteile, sich so hinzulegen, dass der linkslastige Magen tiefer ruht, statt erhöht im Bauch zu hängen. Denn lang gestrecktes Schnabulieren ist bequem, aber nicht ohne Risiko: Magensäfte finden leichter den Weg in die Speiseröhre – Sodbrennen droht. Doch bei Linkslage bleibt der Magen unterhalb der Speiseröhre.

Mir kommt ein weiteres Argument für das Liegen auf der linken Seite in den Sinn, das die Forscher, vielleicht aus Delikatesse, nicht vorbringen. Neben dem zur Speiseröhre führenden Magenmund buchtet sich der Magen aus. Im Stehen liegt diese Magenkuppel oben und sammelt die beim Mahl geschluckte Luft, die wir normalerweise durch gelegentliches Rülpsen wieder entweichen lassen – je nach Kultur diskret oder als lautes Kompliment für gute Küche. Bei Linkslage fällt das Rülpsen sogar noch leichter.

Michael Springer

Doch bei Rechtslage wird dieser Weg vom Speisebrei versperrt, und es drohen schmerzhafte Blähungen. Solche Flatulenzen entladen sich letzten Endes mit Geräusch- und Geruchsbelästigungen, die den Mittafelnden übel aufstoßen. Wer in Zukunft noch einmal zu einem Gastmahl in antik-mediterranem Stil eingeladen werden möchte, sollte sich darum besser gleich auf die richtige Seite legen.

Explosiver Moment. Viele der Phänomene, die kurz nach dem Urknall auftraten, können Teilchenkosmologen mittlerweile rekonstruieren.

SLIM FILMS

Von David Kaiser

Sie ist eines der faszinierendsten Forschungsfelder der heutigen Physik: Indem die Teilchenkosmologie untersucht, wie winzige Bausteine der Materie Struktur und Schicksal des gesamten Kosmos beeinflussen, verbindet sie die Extreme. Im Fokus der Forscher liegen die Wechselwirkungen zwischen äußerst energiereichen Elementarteilchen in den ersten Augenblicken des Universums: Was haben sie bewirkt und wie können sie die kosmische Evolution über Milliarden von Jahren hinweg beeinflussen?

Eine halbe Milliarde Dollar sind in den vergangenen Jahren allein in den USA in diese Disziplin geflossen (zur Situation in Europa S. 34). Der Erfolg des Forschungszweigs ist umso überraschender, als es diesen vor dreißig Jahren noch gar nicht gab. Bis 1975 wurden Teilchenphysik und Kosmologie nämlich als völlig voneinander getrennte Fachgebiete behandelt. Kaum ein Wissenschaftler machte sich Gedanken darüber, ob sie voneinander profitieren könnten. Wie also begann die schnelle Karriere der neuen Disziplin?

Es waren verschiedene Faktoren, die eine Rolle spielten. Die Untersuchung des frühen Kosmos, so erkannten Physiker Mitte der 1970er Jahre, öffnet ein Fenster zu Phänomenen, bei denen so viel Energie umgesetzt wird, dass sie sich in keinem Labor der Welt reproduzieren lassen würden. Zugleich rückten Veränderungen in der Forschungsfinanzierung und in der Lehre die Kosmologie stärker in den Vordergrund. Besonders gut lässt sich diese Geschichte erzählen, wenn man sich auf das Schicksal zweier unterschiedlicher Ideengebäude konzentriert: das von Gravitationsexperten eingeführte Brans-Dicke-Feld und das von Teilchenphysikern konzipierte Higgs-Feld. Beide Ideen sollten ein Problem lösen, das Physiker in den späten 1950er und frühen 1960er Jahren ganz besonders plagte: Woher haben Teilchen ihre Masse?

Nun könnte man annehmen, dass Masse eine so selbstverständliche Eigenschaft von Materie ist, dass ihre Existenz keiner weiteren Erklärung bedarf. Doch das Phänomen der Masse sollte sich auch in das Ideengebäude der modernen Physik einfügen. Und diesem Ansinnen widersetzte es sich nach Kräften. Kosmologen und Spezialisten für Gravitation

Duell der Felder

Die noch junge Disziplin der Teilchenkosmologie führt Elementarteilchenphysiker und Kosmologen zusammen. Die Physikergemeinde hatte allerdings lange gezögert, bis sie die Grenzlinien zwischen den Fächern aufhob.

versuchten damals, das Problem mit Hilfe des Mach'schen Prinzips zu lösen. Dieses Prinzip, das den Namen des österreichischen Physikers und Philosophen Ernst Mach trägt, besagt in etwa: Die Masse eines Objekts – also das Maß seines Widerstands gegen eine Veränderung seiner Bewegung – hat ihren Ursprung letztlich in den gravitativen Wechselwirkungen mit allen anderen Objekten im Universum.

Sonntags war man agnostisch

Um das Mach'sche Prinzip in die Gravitationstheorie zu integrieren, postulierten die Wissenschaftler die Existenz eines neuen Skalarfelds, das mit allen Arten der Materie in Wechselwirkung treten sollte. Skalarfelder besitzen an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt genau einen Wert, mit ihnen lässt sich beispielsweise auch die Temperatur in einem Raum beschreiben. Ausgangspunkt der Überlegungen von Carl Brans, damals Doktorand an der Universität Princeton, US-Bundesstaat New Jersey, und seinem Betreuer Robert Dicke war die Tatsache, dass in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie die Stärke der Schwerkraft durch die Newton'sche Konstante G festgelegt ist. Einstein war davon ausgegangen, dass G überall im Universum den gleichen Wert besitzt und dass sich dieser mit der Zeit nicht ändert.

Um nun das Mach'sche Prinzip zu erfüllen, schlugen Brans und Dicke 1961 vor, dass G orts- und zeitabhängig sein könnte. Sie führten ein Feld namens φ ein, das umgekehrt proportional zu G ist, und ersetzten überall in den Gleichungen von Einsteins Gravitationstheorie G durch $1/\varphi$. Das Feld φ durchdringt nach ihrer Vorstellung den gesamten Raum und bestimmt durch seine Eigenschaften und sein Verhalten, wie sich Materie durch Raum und Zeit bewegt.

Gemäß der Brans-Dicke-Theorie reagiert Materie genau wie in der Allgemeinen Relativitätstheorie auf die Krümmung von Raum und Zeit, zusätzlich aber auch auf Variationen der lokalen Stärke der Gravitation (siehe Abbildung auf S. 28). Jede Messung der Masse eines Objekts hängt deshalb vom lokalen Wert des Felds ab. Vielen erschien dieses Konzept so überzeugend, dass zum Beispiel in der Forschungsgruppe von Kip Thorne am California Institute of Technology damals der Witz umging, man glaube montags, mittwochs und

In Kürze

- **Bis in die 1970er Jahre** blieben Teilchenphysiker und Kosmologen jeweils unter sich. Kaum einer erwartete, etwas von den Kollegen lernen zu können.
- **Drastische Einschnitte** in den Budgets der Teilchenphysik und Reformen in der universitären Lehre in den späten 1960er Jahren wurden Mitauslöser für einen Umbruch. Elementarteilchenphysiker begannen nun, sich auch mit Gravitation und Kosmologie zu beschäftigen.
- **Bald wurde klar:** Der junge Kosmos war ein besserer Teilchenbeschleuniger als alle irdischen Instrumente, sodass er seither im Mittelpunkt der neuen, erfolgreichen Hybriddisziplin der Teilchenkosmologie steht.

Erst die Masse macht's

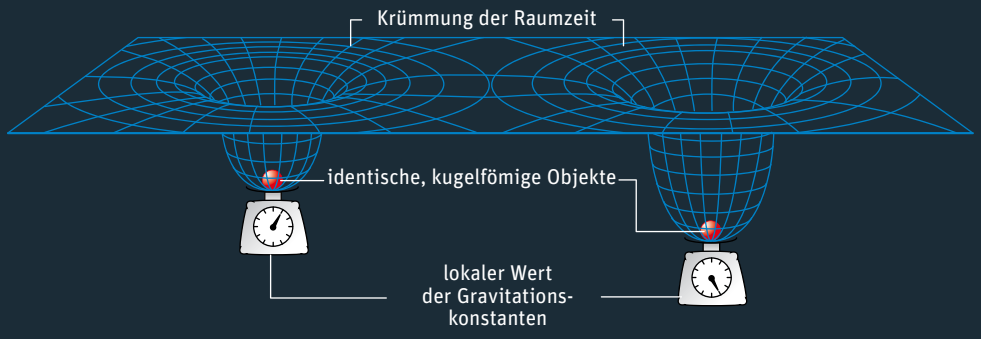
Eigentlich wollten sie dasselbe wissen: Warum besitzen Objekte eine Masse? Doch zwischen Kosmologen und Teilchenphysikern erhob sich in den frühen 1960er Jahren eine unsichtbare Trennmauer. Selbst als sie der Frage mit ähnlichen Theorien auf den Leib rückten, erkannten nur wenige Forscher, dass es eine Verbindung zwischen beiden Ansätzen gab.

Carl Brans

Robert Dicke

FOTO BRANS: LUND. R. CRESSON; FOTO DICKE: CORBIS-BETTMANN; GRAFIK: LUCY READING-IKKANDA

Die Brans-Dicke-Gravitation der Kosmologen



1961 schlugen Carl Brans und Robert Dicke von der Universität Princeton die Existenz eines Felds φ vor, das die Newton'sche Gravitationskonstante als raum- und zeitabhängig beschreibt. Ein Objekt, das sich an einem Ort befindet, wo die Konstante klein ist (links), besitzt weniger Masse und krümmt die lokale Raumzeit daher weniger stark als ein identisches Objekt an einem Ort, wo die Konstante einen großen Wert annimmt (rechts).

Bestimmte Gleichungen verletzten die vorausgesetzten Symmetrien – Massen waren sozusagen nicht erwünscht

freitags an die Allgemeine Relativitätstheorie, dienstags, donnerstags und samstags dagegen an die Theorie von Brans und Dicke (an Sonntagen war man agnostisch).

Das Problem der Masse war zu jener Zeit aber auch in einer anderen wissenschaftlichen Gruppierung aufgetaucht, nämlich jener der Teilchenphysiker – dort allerdings in anderer Form. In den 1950er Jahren waren Theoretiker darauf gestoßen, dass sie die mathematische Behandlung von Kernkräften in den Griff bekamen, wenn sie den Gleichungen, die das Verhalten der subatomaren Teilchen beschreiben, bestimmte Symmetrien auferlegten. Solche Symmetrien besagen beispielsweise, dass Naturgesetze auch dann noch die Wirklichkeit beschreiben, wenn man in den Gleichungen jedes Teilchen durch sein (mit entgegengesetzter Ladung ausgestattetes) Antiteilchen ersetzt und/oder die Richtung des Zeitpfeils umkehrt. Doch jene Bestandteile der Gleichungen, die für gewöhnlich die Massen der Teilchen repräsentierten, verletzten diese speziellen Symmetrien – Massen waren sozusagen nicht erwünscht.

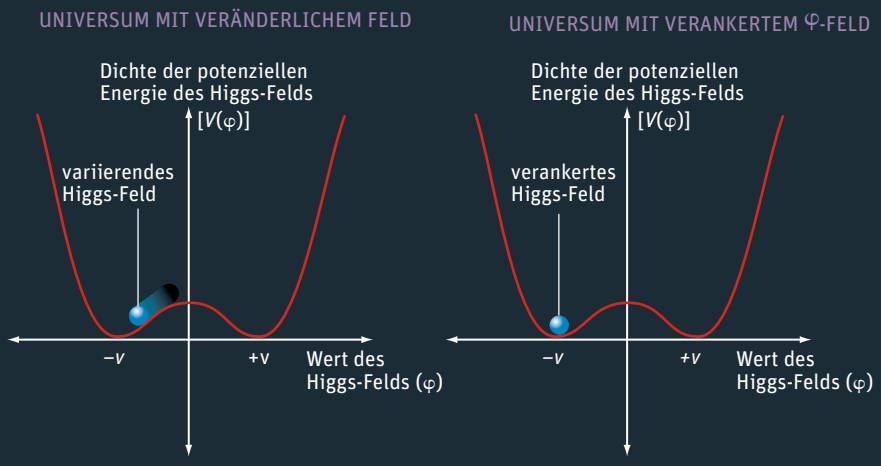
Besonders ausweglos war die Situation bei den W- und Z-Bosonen (den Trägerteilchen der schwachen Kernkraft, die unter anderem für den Zerfall langlebiger Teilchen durch Radioaktivität verantwortlich ist). Wären diese Teilchen tatsächlich masselos, wie es die Symmetrien zu verlangen schienen, dann müsste die Reichweite der Kernkräfte unendlich sein. Zwei Protonen beispielsweise wären dann in der Lage, quer durch die Galaxis über Kernkräfte miteinander zu wechselwirken. Doch die Beobachtungen zeigten klar, dass diese Kräfte in Entfernungen, die größer sind als der Durchmesser von Atomkernen, sehr schnell nachlassen. Kurze Reichweiten wiederum setzen massebehaftete Austauschteilchen voraus.

Das Feld muss sich entscheiden

Dieses Rätsel beschäftigte damals viele Physiker und sie versuchten, die Symmetrieeigenschaften der subatomaren Kräfte mit massebehafteten Austauschteilchen unter einen Hut zu bringen. Jeffrey Goldstone, damals an der Universität Cambridge, erkannte 1961, dass die Lösungen von Gleichungen nicht unbedingt den gleichen Symmetrien gehorchen müssen wie die Gleichungen selbst. Als einfaches Beispiel wählte er ein Skalarfeld, das er zufälligerweise ebenfalls φ taufte, mit einer bestimmten Eigenschaft: Die Dichte der potenziellen Energie des Felds $V(\varphi)$ wird an zwei Stellen von φ, nämlich bei $\varphi = -v$ und $\varphi = +v$, gerade null (siehe Abbildung rechte Seite). Weil alle physikalischen Systeme einem Zu-

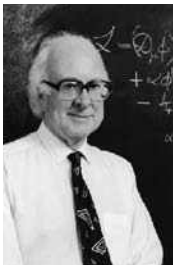
Das Higgs-Feld der Teilchenphysiker

1961 führte Jeffrey Goldstone, der damals an der Universität Cambridge forschte, ein Feld ein – zufällig ebenfalls mit Namen Φ –, dessen potenzielle Energiedichte $V(\Phi)$ bei $\Phi = +v$ und $\Phi = -v$ gerade null wird. Drei Jahre später gelang es Peter Higgs von der Universität Edinburgh, mit Hilfe dieses Felds die Masse zu erklären. Im sehr frühen Universum (links), als Φ noch variabel war, waren die Elementarteilchen masselos. Erst später, als das Feld in eines der Minima bei $\pm v$ »gezogen« wurde, nahmen die Teilchen eine Masse an.



GRAFIK: LUCY READING-IKKANDA; FOTO GOLDSTONE: AIP ESVA; FOTO HIGGS: PETER TUFFY, UNIVERSITY OF EDINBURGH

Jeffrey Goldstone



Peter Higgs

stand minimaler Energie zustreben, nimmt Φ schließlich einen dieser beiden Werte ein. Das Feld muss sich dabei entweder für $+v$ oder $-v$ »entscheiden« – die Lösung der Gleichung bricht also spontan die ursprünglich in der Gleichung vorhandene Symmetrie.

Eine Theorie wiederum, die einen solchen spontanen Symmetriebruch enthält, erlaubt die Existenz von massebehafteten Teilchen, wie Peter Higgs von der Universität Edinburgh drei Jahre später herausfand. Als er sich nämlich 1964 Goldstones Arbeiten noch einmal vornahm, kam er zu folgendem Ergebnis: Die Masse entsteht genau dann, wenn das Φ-Feld mit einem Teilchen wechselwirkt – dies gilt für alle Teilchensorten einschließlich der W- und Z-Bosonen, die die schwache Kernkraft erzeugen. Und die Gleichungen, die diese Wechselwirkungen beschreiben, erfüllten alle vorausgesetzten Symmetrien.

Vorstellen kann man sich das nun so: Solange Φ nach dem Urknall noch keines der Minima seiner potenziellen Energie einnahm, hüpften alle Teilchen (im Wortsinn) unbeschwert durch die Welt. Als Φ sich allerdings für $+v$ oder $-v$ entschieden hatte, übte das so verankerte Feld einen Zug auf alle daran gekoppelten Teilchen aus. Seither erleben sie das subatomare Äquivalent dessen, was es bedeutet, durch zähen Sirup gezogen zu werden. Sie begannen also, sich zu verhalten, als besäßen sie eine Masse, und jede Messung ihrer Masse hängt nun vom lokalen Wert von Φ ab.

In den frühen 1960er Jahren nun trafen die Arbeiten von Brans und Dicke sowie die von Higgs gewissermaßen aufeinander. Sie erschienen etwa zur gleichen Zeit in ein und demselben Fachjournal, dem »Physical Review«. Beide erregten sofort viel Aufmerksamkeit; sie zählen bis heute zu den meistzitierten physikalischen Artikeln aller Zeiten. Und beide schlagen vor, den Ursprung der Masse durch die Einführung eines neuen Skalarfelds zu erklären, das mit allen Arten von Materie wechselwirkt. Doch wie reagierte die Fachwelt? Es wäre ja nun zu erwarten gewesen, dass die Physiker die Ansätze miteinander verknüpften. Doch das geschah kaum: Von 1083 Arbeiten, die zwischen 1961 und 1981 eine der beiden Publikationen zitierten, enthalten lediglich sechs beide Arbeiten in der Liste ihrer Referenzen. Eine davon stammt von 1972, alle weiteren erschienen erst nach 1975.

Offensichtlich erblickten die jeweiligen Forschergemeinschaften in ihren jeweiligen Φ's völlig Verschiedenes. Wer sich mit Gravitation und Kosmologie beschäftigte, sah das Brans-Dicke-Feld Φ_{BD} als interessante Alternative zu Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie. Die Teilchenphysiker hingegen hofften,

Brückenschlag zu neuen Ufern

Eine neue Physikergeneration, die sowohl in Teilchentheorie als auch in Kosmologie ausgebildet worden war, erkannte Ende der 1970er Jahre die Verbindung zwischen der Brans-Dicke-Gravitation und dem Higgs-Feld.

Anthony Zee

▷ Einer der herausragendsten Teilchenkosmologen. Als Student arbeitete Zee bei dem Gravitationsexperten John Wheeler an der Universität Princeton. Dann schrieb der chinesisch-amerikanische Theoretiker seine Doktorarbeit über die Teilchentheorie. Nach einem Forschungsurlaub in Paris im Jahr 1974 wandte er sich wieder kosmologischen Themen zu.

Lee Smolin

▷ Leistete wesentliche Beiträge zu Quantengravitation und Stringtheorie. In den 1970er Jahren studierte er als Harvard-Doktorand sowohl Teilchentheorie als auch Kosmologie. Er arbeitete eng mit Stanley Deser von der Brandeis-Universität zusammen, einem der Pioniere der Quantengravitation, die Quantenphysik mit der Gravitationstheorie vereinigen soll.

Alan Guth

▷ Begründer der Theorie der kosmischen Inflation. Guth wurde 1972 am Massachusetts Institute of Technology über Teilchenphysik promoviert. Zur Kosmologie kam er, nachdem er Ende der 1970er eine Vorlesung von Robert Dicke über das Problem des flachen Universums gehört hatte.

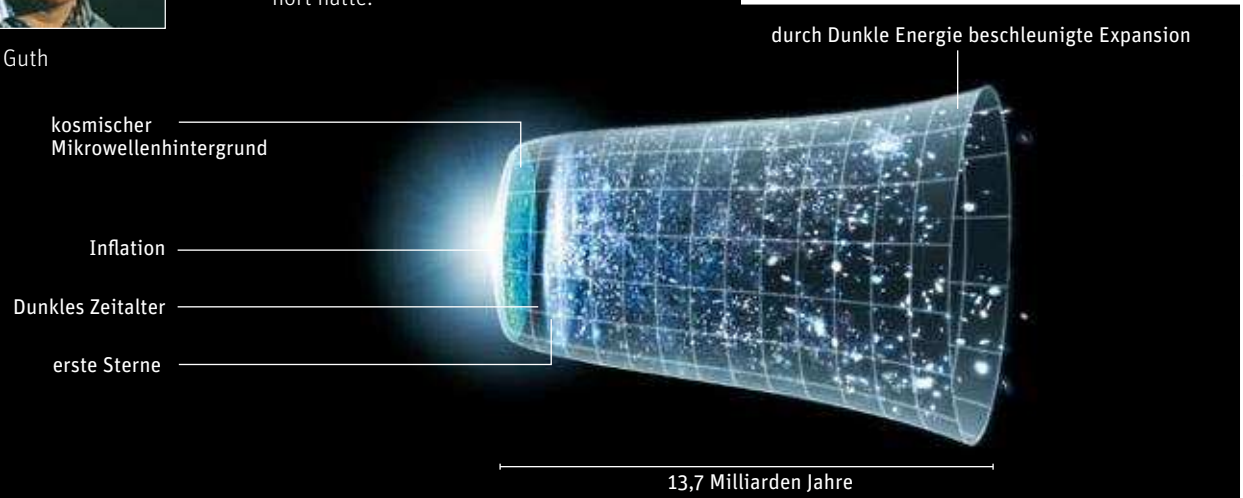
dass ihnen das Higgs-Feld φ_H eine Erklärung für das Verhalten der Kernkräfte gegenüber Masseteilchen liefern würde.

Doch gegen Ende der 1970er Jahre veränderte sich die Situation des gegenseitigen Desinteresses radikal. Als Gründe dafür benennen die meisten Physiker vor allem zwei Entwicklungen, die die Verschmelzung der Forschungsgebiete und den rasanten Aufstieg der Teilchenkosmologie vorantrieben: die Entdeckung der »asymptotischen Freiheit« im Jahr 1973 und die Konstruktion der ersten »großen Vereinheitlichungstheorien« 1973 und 1974.

Überraschender Effekt

Die asymptotische Freiheit bezeichnet ein unerwartetes Phänomen, das bei bestimmten Theorien der Teilchenwechselwirkungen auftritt: Die Stärke der Wechselwirkung nimmt ab, wenn die Energie der Teilchen zu-, das heißt ihr Abstand abnimmt – bei den meisten anderen Kräften ist das Gegenteil der Fall. Sie versetzte die Teilchenphysiker aber erstmals in die Lage, genaue und verlässliche Berechnungen von Phänomenen wie der starken Kernkraft durchzuführen. (Die starke Kernkraft ist dafür verantwortlich, dass sich Quarks zu Protonen und Neutronen, den Bausteinen des Atomkerns, zusammenschließen.) Das gelang ihnen zumindest dann, wenn sie sich auf die Untersuchung sehr hoher Energien beschränkten, die jenseits der experimentellen Möglichkeiten lagen.

Auch die Vereinheitlichungstheorien – grand unified theories oder kurz GUTs ge-



ZEE: MIT FRDL. GEN. VON A. ZEE; SMOLIN: DINA GRASER; GUTH: PHOTO RESEARCHERS INC.; DAVID PARKER; GRAFIK: NASA / WMAP SCIENCE TEAM

Unabhängig voneinander veröffentlichten Zee und Smolin im Jahr 1979 ihre Arbeiten, in denen sie die Gravitationsgleichungen von Brans und Dicke mit dem symmetriebrechenden Potenzial von Goldstone und Higgs kombinierten. 1981 führte Guth ein weiteres Feld ein, das Inflaton.

Dieses Feld sorgte für die von ihm postulierte superschnelle Expansion – die so genannte Inflation – in der Frühphase des Kosmos, die sowohl die gleichmäßige Materieverteilung im Universum erklärte als auch beschrieb, warum das Universum »eben« und nicht merklich gekrümmt ist.

nannt – lenkten die Aufmerksamkeit der Forscher auf hohe Energien. Vor allem auch dank der Theorie der Supersymmetrie, die der kürzlich verstorbene österreichische Physiker Julius Wess und sein Kollege Bruno Zumino im Jahr 1973 vorgestellt hatten, entdeckten die Teilchenphysiker, dass die Stärken von drei der fundamentalen Wechselwirkungen, nämlich Elektromagnetismus sowie schwache und starke Kernkraft, möglicherweise konvergieren, wenn die Energie der Teilchen ansteigt.

Oberhalb einer bestimmten Energie, so spekulierten die Theoretiker, würden alle drei Kräfte wie eine einzige undifferenzierte Kraft wirken. Mit rund 10^{24} Elektronenvolt wäre die Schwellenenergie für diese große Vereinigung der Kräfte allerdings astronomisch hoch: Das ist das Billiardenfache dessen, was Teilchenbeschleuniger bislang erreichen, und mehr, als sie jemals erreichen können.

Und doch könnte diese Schwelle sogar schon einmal überschritten worden sein. Denn wenn das Universum in einem heißen Urknall entstand, dann besaßen die Teilchen in den ersten Sekundenbruchteilen seiner Existenz tatsächlich außerordentlich hohe Energien. So kam es also, dass asymptotische Freiheit und GUTs den Teilchenphysikern plötzlich einen guten Grund lieferten, nicht auf größere Teilchenbeschleuniger zu warten, sondern sich mit dem frühen Universum zu befassen.

Doch ist das schon die ganze Geschichte? Sicherlich waren die Fortschritte in der Teilchenphysik von Bedeutung – aber gaben sie wirklich den Ausschlag? Die zeitliche Abfolge der Ereignisse weckt daran Zweifel. Schon vor der Entdeckung von asymptotischer Freiheit und GUTs im Jahr 1973 hatte die Zahl der Veröffentlichungen zu kosmologischen Themen schnell zu wachsen begonnen (weltweit ebenso wie allein in den USA), und diesem Wachstum fügten auch die zwei neuen Arbeitsgebiete nichts hinzu. Außerdem sorgten die GUTs selbst um das Jahr 1980 herum nicht einmal unter Teilchenphysikern für viel Aufsehen. Drei der ersten, zwischen 1978 und 1980 erschienenen Übersichtsartikel über die Teilchenkosmologie ignorierten die beiden Themen sogar völlig.

Ganz offensichtlich mussten auch noch andere Faktoren der neuen Teildisziplin den Weg ebnen. Geld war einer davon. Bis Mitte der 1960er Jahre hatten die US-Physiker von einer »Cold War Bubble« profitiert, einer politisch motivierten Phase großzügiger staatlicher Unterstützung. Danach aber wendete sich das Blatt. Im Zusammenhang mit dem Vietnamkrieg kam es zu drastischen Einschnitten in den Budgets, auch die vom Verteidigungsministerium für Grundlagenforschung bereitgestellten Gelder wurden stark zurückgefahren.

Unter nahezu allen Natur- und Ingenieurwissenschaften traf es die Physik am härtesten. Die Anzahl der Promotionen beispielsweise fiel von 1970 bis 1975 fast so schnell, wie sie in den Jahren nach dem Sputnik-Schock gestiegen war; angehende Physiker fanden kaum noch Jobs. Gerade aus der Teilchenphysik, deren Budgets in wenigen Jahren um die Hälfte gekürzt worden waren, wanderten massenhaft Talente ab. Gravitationsforschung und Kosmologie indessen erlebten parallel dazu einen gewaltigen Aufschwung, woran auch die Entdeckung von Quasaren, Pulsaren und der kosmischen Strahlung um die Mitte der 1960er Jahre ihren Anteil hatte: Die Zahl der Doktoranden schnellte nach oben, während sie anderswo in der Physik stark zurückging.

1972 schließlich nahm die Nationalakademie die Misere in der Teilchenphysik ins Blickfeld. Junge Theoretiker seien »zu stark spezialisiert« und hätten folglich Probleme, das Arbeitsfeld zu wechseln, sie sollten daher eine breitere Ausbildung erhalten. Die Universitäten reagierten unter anderem dadurch, dass sie Gravitation und Kosmologie in der Lehre mehr Platz einräumten. Und plötzlich warfen auch die Fachverlage stapelweise entsprechende Fachbücher auf den Markt, um die Nachfrage zu bedienen.

Auf einen Stapel Blätter gestoßen

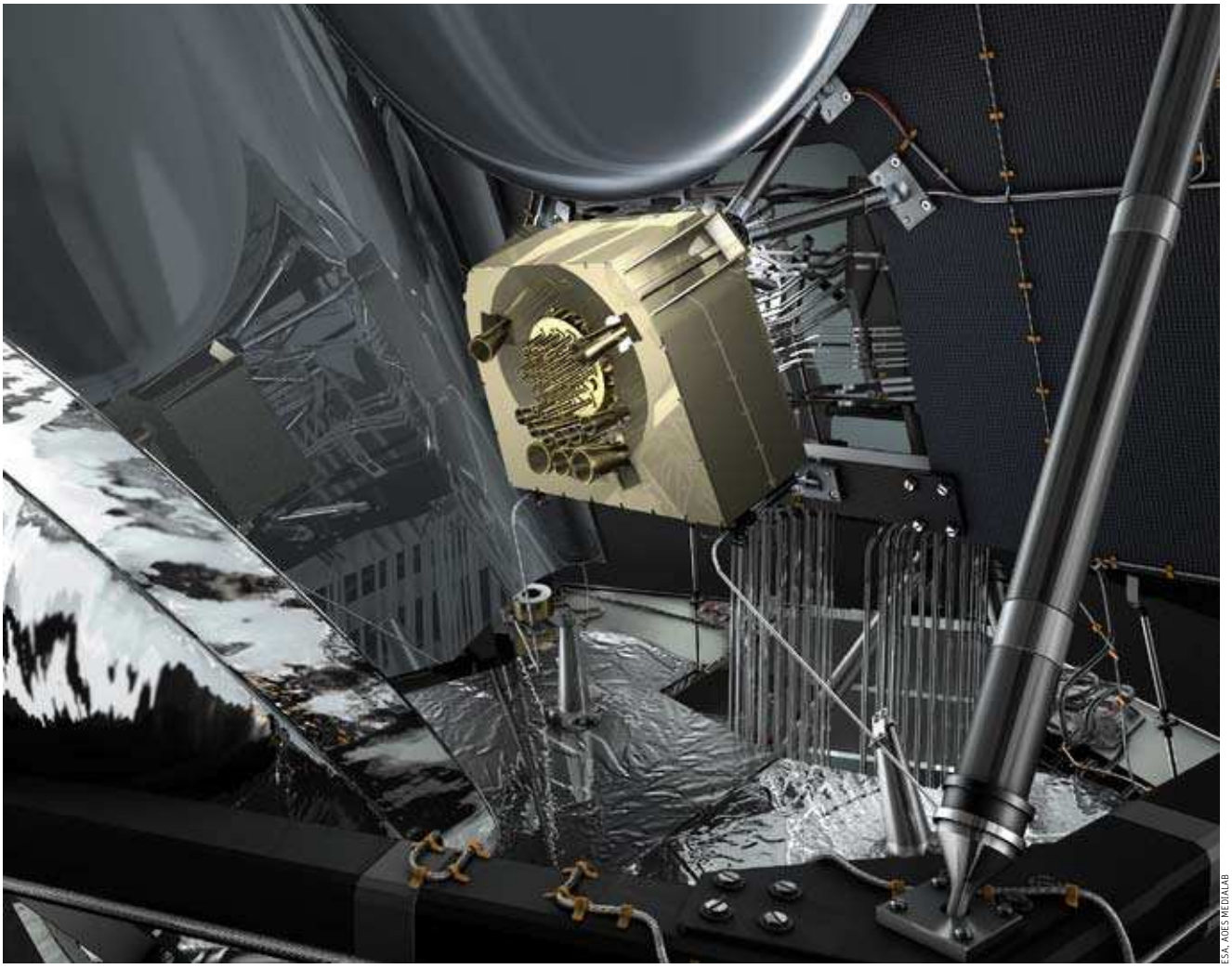
Die Folgen für den wissenschaftlichen Nachwuchs blieben nicht aus. Anthony Zee und Lee Smolin beispielsweise gehörten zu jenen, die sich nach dem Platzen der »Cold War Bubble« der Kosmologie zuwandten. Zee hatte Mitte der 1960er Jahre als Student bei dem Gravitationsforscher John Wheeler in Princeton gearbeitet. 1970 wurde er in Harvard über Elementarteilchentheorie promoviert, genau zu dem Zeitpunkt, als diese Disziplin ihren Einbruch erlebte.

Doch 1974, während eines Forschungsurlaubs in Paris, half der Zufall nach. Zee, der mittlerweile in Princeton lehrte, hatte seine Wohnung vorübergehend mit der eines französischen Physikers getauscht und stieß in dessen Räumen auf einen Stapel europäischer Veröffentlichungen, die kosmologische Probleme mit Hilfe von Ideen aus der Teilchenphysik zu lösen versuchten – wie etwa die Frage, warum das Universum mehr Materie als Antimaterie enthält. Erneut war sein Interesse geweckt. Nach seiner Rückkehr nahm er wieder Kontakt zu Wheeler auf und wandte sich verstärkt der Teilchenkosmologie zu.

Die asymptotische Freiheit lieferte endlich einen Grund, nicht mehr auf noch größere Teilchenbeschleuniger zu warten

Nicht lange konstant

Albert Einstein betrachtete die Gravitationskonstante noch als unveränderlich. Aber es waren nicht erst Carl Brans und Robert Dicke gewesen, die an dieser Auffassung rüttelten. Schon ab 1946 schrieb der deutsche theoretische Physiker Pascual Jordan über eine »Relativistische Gravitationstheorie mit variabler Gravitationskonstanten« (Die Naturwissenschaften, Bd. 33, S. 250 – 251, 1946). Er griff damit Spekulationen des Quantenphysikers Paul Dirac auf. Der Brite Dirac nämlich hatte bereits einige Jahre zuvor – im Rahmen von Überlegungen zur Ausdehnung des Universums – über die Möglichkeit zeitlich veränderlicher Fundamental-»Konstanten« nachgedacht.



ESA, AOES MEDIALAB

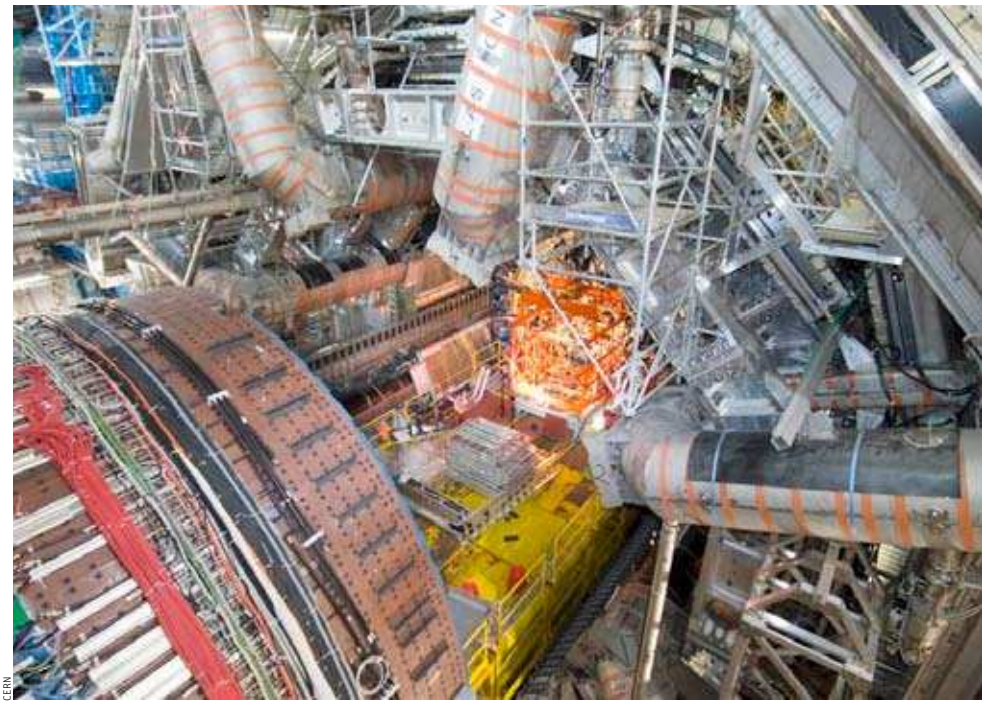
Vom Planck-Satelliten der Esa, der ab 2008 die kosmische Hintergrundstrahlung noch genauer vermessen soll, erhoffen sich Teilchenphysiker richtungsweisende Ergebnisse. Sie könnten Debatten beenden, die mangels geeigneter Daten derzeit unentscheidbar sind. Die Illustration zeigt Details des Instruments. In der Mitte liegt die Brennebene des Teleskops.

Lee Smolin dagegen hatte 1975 sein Graduiertenstudium in Harvard begonnen, gerade als nun auch Gravitation und Kosmologie auf dem Lehrplan standen. Smolin arbeitete in dieser Zeit eng mit Stanley Deser von der Brandeis-Universität zusammen, der damals als Gastforscher in Harvard weilte. Deser hatte sich, als einer von nur wenigen amerikanischen Theoretikern, schon in den 1960er Jahren für die Verbindung von Gravitation und Quantenmechanik zu einer Quantengravitation interessiert. Im Jahr 1972 war er übrigens auch der erste Physiker, der sowohl die Arbeit von Brans und Dicke als auch die von Higgs zitierte (wobei er beide allerdings, sauber voneinander getrennt, in separaten Abschnitten behandelte).

Die Zusammenarbeit zwischen den Disziplinen trug schnell Früchte. Im Jahr 1979 schlugen sowohl Smolin in Harvard als auch Zee, damals an der Universität von Pennsylvania, unabhängig voneinander vor, dass φ_{BD} und φ_H ein und dasselbe Feld seien. Sie verbanden die Gravitationsgleichungen von Brans und Dicke mit dem symmetriebrechenden Potenzial von Goldstein und Higgs. In dem neuen Modell variiert die lokale Stärke der Gravitation zunächst in Raum und Zeit, wobei G proportional zu $1/\varphi^2$ ist. Der heute konstante Wert ergibt sich daraus, dass das φ-Feld zu einem bestimmten Zeitpunkt in das Minimum des symmetriebrechenden Potenzials »rutscht«. Dazu war es möglicherweise bereits in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall gekommen.

Smolins und Zees Arbeiten boten damit auch eine Erklärung dafür an, warum die Gravitation im Vergleich zu den anderen Kräften so schwach ist: Sobald das Feld seinen endgültigen Zustand $\varphi = \pm v$ annimmt, wird φ bei einem großen Wert ungleich null verankert, sodass G (das dazu umgekehrt proportional ist) sehr klein wird.

Dann ging es Schlag auf Schlag. 1980 bemerkte Zee, dass das kosmologische Urknallmodell nicht in der Lage war, die – zumindest auf den größten Skalen betrachtet – außergewöhnlich gleichmäßige Verteilung der Materie im Universum zu erklären. Unabhängig davon kam Dicke zu dem Schluss, dass



CERN

Woher kommt die Masse? Detektoren wie Atlas (noch im Bau befindlich), der zur bald fertig gestellten Teilchenbeschleunigeranlage LHC in Genf gehört, sollen endlich Antworten liefern.

der Urknall auch nicht die Frage beantwortet, warum das Universum flach und nicht merklich gekrümmt ist.

Beide Probleme löste dann Alan Guth vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, indem er 1981 die »inflationäre Kosmologie« einführte. Für sein Modell hatte er ein weiteres, ebenfalls nach dem Vorbild des Higgs-Felds entwickeltes Skalarfeld postuliert. Dieses so genannte Inflaton lieferte die Antriebsenergie für die »Inflation«, die von Guth postulierte Phase einer superschnellen Expansion des Kosmos kurz nach dem Urknall.

Könnte sich die Geschichte wiederholen?

Spätestens jetzt begann sich das neue Hybridgebiet der Teilchenkosmologie zu etablieren. Neben Smolin, Zee und Guth verfolgten nun auch Theoretiker wie Paul Steinhardt, Michael Turner und Edward Kolb in jenen Jahren wissenschaftliche Karrieren, in denen sie Gravitation mit Teilchenphysik verbanden.

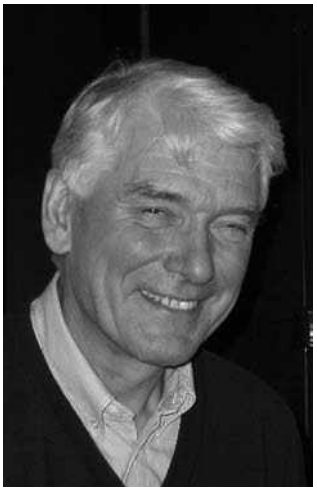
Aber auch für Andrei Linde, damals noch am Moskauer Lebedev-Institut für Physik, war die Inflation zum richtigen Zeitpunkt gekommen. Er hatte in Moskau studiert, wo Teilchenphysik und Gravitationsforschung seit Langem Seite an Seite gediehen, und bald schon gelangen ihm Verbesserungen der Theorie. Seither gehen Teilchenkosmologen routinemäßig mit Brans-Dicke-, Higgs- und Inflaton-Feldern und deren Kombinationen um und erklären damit zahlreiche physikalische Phänomene.

Wissenschaftliche Gründe allein waren es allerdings nicht gewesen, die diesen Umbruch zu Wege gebracht hatten. Vielmehr zeigte sich hier, wie auch institutionelle Veränderungen und eine Neuausrichtung der universitären Lehre wissenschaftliche Denkweisen umsteuern können.

Wiederholt sich die Geschichte nun? In den 1990er Jahren traf es die Teilchenphysik noch einmal hart. Damals wurde in den USA zuerst das Projekt des »Superconducting SuperCollider« abgebrochen, ein gewaltiger Teilchenbeschleuniger, der in Texas gebaut werden sollte. Auch heute schrumpfen die Forschungsbudgets wieder. Vielleicht sind die hitzigen Debatten, in denen Stringtheoretiker mit Vertretern alternativer Strategien derzeit über die Richtung der theoretischen Physik streiten, ein altbekanntes Symptom – dafür nämlich, dass die Teilchenphysik derzeit vor ähnlichen Problemen steht wie einst gegen Ende der 1960er Jahre.

Entsprechend ungeduldig wartet man nun auf die ersten Ergebnisse von Projekten, die im kommenden Jahr ihre Arbeit aufnehmen sollen: dem Large Hadron Collider (LHC) in der Schweiz, dem Gamma-Ray Large Area Space Telescope (Glast) der US-Raumfahrtbehörde Nasa und dem Planck-Satelliten der europäischen Weltraumagentur Esa, der die kosmische Hintergrundstrahlung mit bislang unerreichter Genauigkeit vermessen soll. Mit ein wenig Glück wird die Hochenergiephysik daraus ebenso erneuert und verjüngt hervorgehen, wie sie das vor dreißig Jahren schon einmal tat. ◁

David Kaiser wurde an der Harvard-Universität sowohl in theoretischer Physik als auch in Geschichte der Naturwissenschaften promoviert. Derzeit lehrt er als Associate Professor am Massachusetts Institute of Technology. Sein jüngstes Buch »Drawing Theories apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics« (University of Chicago Press, 2005) untersucht, wie die Forschergemeinde auf Richard Feynmans eigenwilligen Zugang zur Quantenmechanik reagierte. Derzeit arbeitet Kaiser an einem neuen Buch über die Physik in der Zeit des Kalten Kriegs und legt seinen Schwerpunkt dabei auf die Ausbildung von Studierenden. Als Teilchenkosmologe versucht er, die kosmische Inflation mit den von der Stringtheorie postulierten zusätzlichen Raumdimensionen zu vereinbaren.



Franz von Feilitzsch, Mitverfasser eines aktuellen europäischen Strategiepapiers zur Astroteilchenphysik, lehrt als Nachfolger des Nobelpreisträgers Rudolf Mößbauer an der Technischen Universität München (TUM), wo er Neutrinos und Dunkle Materie erforscht. Er hat den ersten deutschen Lehrstuhl inne, der Anfang der 1990er Jahre der Astroteilchenphysik gewidmet worden war. Ab 1995 war er Sprecher des Sonderforschungsbereichs SFB »Astroteilchenphysik«, den die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) damals als europaweit wohl ersten Wissenschaftsverbund seiner Art einrichtete.

Bricht die »Goldene Dekade der Astroteilchenphysik« an?

Europa und insbesondere Deutschland mischen kräftig mit, wenn es um das Schließen fundamentaler Lücken im physikalischen Weltbild geht.

Die junge Disziplin der Astroteilchenphysik, in der Teilchenphysiker, Astronomen und Kosmologen ihre Kräfte vereinen, ist auf der Suche nach Antworten. Zerfällt das Proton tatsächlich, was die Großen Theorien zur Vereinheitlichung der vier Grundkräfte bestätigen würde? Welche Eigenschaften haben Neutrinos und wie wirken sie sich auf die kosmische Evolution aus? Wann erfahren wir endlich, was die Dunkle Materie ist, die in unserem Universum so einflussreich ist?

Die im Juni nach vierjähriger Arbeit veröffentlichte »Astroparticle Physics Roadmap Phase I« geht nun davon aus, dass die Europäer von 2009 bis 2015 zwischen 1,3 und 1,9 Milliarden Euro für die Astroteilchenphysik ausgeben werden. Nicht eingerechnet sind Projekte unter 50 Millionen Euro. Ein gutes Drittel davon fließt in die Erforschung der Neutrinos und des (vermuteten) Protonenzerfalls, weitere Themen sind Dunkle Masse, kosmische Strahlung und Gravitationswellen. Das vom Koordinationsgremium für die europäische Astroteilchenphysik Appec verfasste Strategiepapier fragt sogar, ob nun die »Morgendämmerung einer Goldenen Dekade der Astroteilchenphysik« angebrochen ist.

Bis zu 1,9 Milliarden Euro gibt Europa bis 2015 für die Astroteilchenphysik aus

Spektrum: Herr Professor von Feilitzsch, wieso spielen Europäer in der aufstrebenden Astroteilchenphysik überhaupt eine wichtige Rolle?

Franz von Feilitzsch: Das mache ich gerne an der Neutrinophysik fest. Die in den 1960er Jahren begonnenen Experimente des US-Nobelpreisträgers Raymond Davis hatten erstmals gezeigt, dass uns von der Sonne nur ein Drittel des theoretisch erwarteten Neutrinoflusses erreicht. 1990 startete dann das europäische Gallex im italienischen Untergrundlabor Gran Sasso. Das vor allem von Deutschland betriebene Experiment, bei dem sich auch die TUM engagierte, brachte uns einen wesentlichen Schritt weiter: Durch die Verwendung von Gallium-71 als Detektormaterial – Davis hatte Chlor eingesetzt – erfassten wir auch Neutrinos niedriger Energie, die aus dem allerersten Glied der Fusionskette stammen, in deren Verlauf Protonen in der Sonne zu Helium »verbrennen«.

Es blieb allerdings dabei, dass weiterhin solare Neutrinos zu fehlen schienen. Die einzig möglichen Erklärungen waren ihr Zerfall oder ihre Oszillation, also die Umwandlung in andere Arten von Neutrinos während des Flugs. Beide Phänomene aber widersprachen den Vorhersagen, und so lieferte Gallex den ersten klaren Beweis für eine Teilchenphysik jenseits des Standardmodells. Gleichzeitig war dies einer der ersten europäischen Schritte in der Astroteilchenphysik. Danach bedurfte es allerdings noch des japanischen Neutrinodetektors Superkamiokande und des kanadischen Sudbury Neutrino Observatory SNO, um endgültig zu zeigen, dass Neutrinos tatsächlich oszillieren und nicht zerfallen.

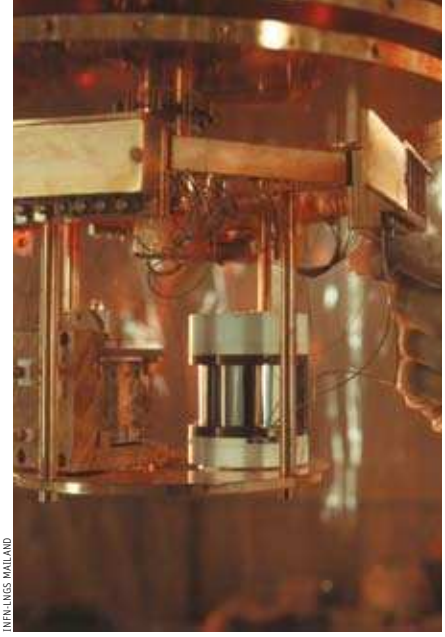
Auch wichtige theoretische Fortschritte wie die Entwicklung der Supersymmetrie gelangen in Deutschland. Der leider kürzlich verstorbene Österreicher Julius Wess war es, der 1973 in Karlsruhe die erste Version dieser Theorie zusammen mit Bruno Zumino vorgestellt hatte. Von den leichtesten »Susy«-Teilchen vermutet man, dass sie einen großen Teil der Dunklen Materie ausmachen könnten. Doch von denen ist noch keines entdeckt.

Spektrum: Die Appec-Roadmap wirkt sehr ehrgeizig. Wie gut ist die Astroteilchenphysik mittlerweile etabliert?

von Feilitzsch: Endgültig in die universitäre Forschung integriert war sie spätestens 1995, als die DFG den ersten SFB errichtete, der unter meiner Leitung mehrere Münchner Forschungsinstitute umfasste und bis 2006 lief. Jetzt bekam er gewissermaßen zwei Töchter: die überregionalen Transregios »Dark Universe« in Heidelberg sowie »Neutrinos and Beyond« unter Leitung meines TUM-Kollegen Lothar Oberauer. Auch der Exzellenzcluster »Origin and Structure of the Universe« ist jetzt in München und Garching angesiedelt. Darüber hinaus zeigt die Roadmap, wie nachhaltig die Astroteilchenphysik gefördert wird.

Spektrum: Zu den darin »nachdrücklich empfohlenen« Experimenten gehört Borexino, ebenfalls in Gran Sasso. Warum?

PAOLO LOMBARDI / INFN-LNGS, MAILAND



INFN-LNGS MAILAND

Fotovervielfacher im Innern der Stahlkugel, die den Neutrinodetektor Borexino umschließt, registrieren das im Detektor erzeugte Szintillationslicht und verstärken es. Das linke Bild zeigt Wissenschaftler und Techniker bei Installationsarbeiten wenige Monate vor Inbetriebnahme. Rechts ist ein Prototyp des Cresst-Detektors zu sehen. Selbst wenn ihn ein Dunkle-Materie-Teilchen nur um wenige millionstel Grad erwärmen sollte, wird die Temperaturveränderung registriert.

von Feilitzsch: Neben dem SNO und dem russisch-amerikanischen Sage ist Borexino weltweit das dritte Experiment, das ausdrücklich solaren Neutrinos gewidmet ist. Im Mai ging es endlich in Betrieb. Hier messen wir mit Hilfe von 300 Tonnen eines Flüssigszintillators etwa 140 solare Neutrinos pro Tag. Einzigartig bei diesem Instrument der zweiten Generation ist, dass wir Neutrinos sehr niedriger Energie sogar in Echtzeit messen, sodass wir Zweige der Fusionskette untersuchen und so unser Sonnenmodell verbessern können. Andere Detektoren können Neutrinoereignisse lediglich über lange Zeiträume hinweg integrieren.

Spektrum: Was kann Borexino über die Neutrinos in Erfahrung bringen?

von Feilitzsch: Borexino sucht insbesondere nach Beryllium-7-Neutrinos mit einer Energie von 0,86 MeV. Die sind besonders wichtig für die vollständige Aufklärung des Oszillationsphänomens. In »Neutrinos and Beyond« beschäftigen wir uns derzeit vor allem mit der Frage der Oszillation zwischen Elektron- und Tau-Neutrino, also der Umwandlung des ersten Neutrinotyps in den dritten. Die Wahrscheinlichkeit für diesen sehr fundamentalen Übergang ist offenbar äußerst klein, was theoretisch noch unverstanden ist.

Spektrum: Wo stehen die Europäer bei der Suche nach Dunkler Materie?

von Feilitzsch: Das vorwiegend deutsche Experiment Cresst, ebenfalls in Gran Sasso, ist noch nicht gleichauf mit dem Cold-Dark-Matter-Search-Projekt. Das wird mit viel mehr Geld am kalifornischen Berkeley Center for Particle Astrophysis durchgeführt. Mit dem geplanten Cresst-Nachfolger Eureca werden wir aber mindestens gleichziehen. Eureca gehört ebenfalls zu den Prioritäten der Roadmap und ist europäisch angelegt.

An der TUM haben wir für Cresst ein Phasenübergangsthermometer entwickelt. Das ist technisch zwar aufwändiger als übliche Halbleiterthermometer, bietet aber eine größere Empfindlichkeit. Es soll Dunkle-Materie-Partikel über den Rückstoß nachweisen, den sie bei der elastischen Streuung an Atomkernen auf diese übertragen. Unser Detektorkristall wird dafür auf genau der Temperatur gehalten, bei der das Thermometer auf dem dielektrischen Kristall von normaler Leitfähigkeit zur Supraleitfähigkeit übergeht. Wird es durch die Rückstoßenergie auch nur geringfügig wärmer, steigt sein Widerstand stark an. So registriert der Detektor sogar einen Temperaturanstieg von wenigen millionstel Grad.

Spektrum: Was tut sich noch in der Astroteilchenphysik?

von Feilitzsch: Neben den Phänomenen niedriger Energie, über die wir gesprochen haben und die eher eine Domäne der DFG und der Universitäten ist, steht das »High Energy Universe« im Fokus. Große Erfolgsgeschichten dieser vor allem von Max-Planck-Gesellschaft und Helmholtz-Gemeinschaft geförderten Untersuchungen sind etwa die Gammastrahlenteleskope Magic auf La Palma und H.E.S.S. in Namibia. Jenseits solcher technischen Fortschritte dürften die großen Durchbrüche aber bei niedrigen Energien kommen. Hier gab es etwa den Nobelpreis 2006 für die Untersuchung der kosmischen Hintergrundstrahlung und 2002 für die Entdeckung kosmischer Neutrinos. Und von den fünf Schwerpunkten der Roadmap widmet sich zwar einer den hohen Energien, ein weiterer den Gravitationswellen, aber gleich drei betreffen Niedrigenergiephänomene: Dunkle Materie, Protonenzerfall und Neutrinoeigenschaften. Und bei jedem von diesen geht es um grundlegende Fragen, die wir an unseren Kosmos haben. ◁

Die Fragen stellte **Thilo Körkel**, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Weiterführender Weblink

»Astroparticle Physics Roadmap Working Page« der Appec (Download der Roadmap möglich):

https://ptweb.desy.de/appec/

Warum die Tage länger werden

Jahrtausendealte Aufzeichnungen von Sonnen- und Mondfinsternissen belegen: Unser Globus dreht sich immer langsamer. Grund ist die Gezeitenreibung, deren Einfluss aber durch andere Faktoren abgemildert wird.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

MICHAEL SCHLÜNDER

Schon Babylonier und die alten Ägypter waren von Sonnenfinsternissen fasziniert, sodass wir über zuverlässige astronomische Beobachtungen bis zurück ins Jahr 700 v. Chr. verfügen. Heute dienen sie dazu, die Verlangsamung der Erdrotation zu bestimmen. Die Aufnahme entstand während einer partiellen Sonnenfinsternis.

Von F. Richard Stephenson

Der Lauf der Sonne galt lange Zeit als verlässlichster Anhaltspunkt für die Messung der Zeit: Wenn sie wieder ihren höchsten Stand an der Himmelskugel erreichte, war genau ein Tag vorüber. Doch die so gemessenen Tage sind keineswegs alle gleich lang, denn die Erde rotiert mit nachlassendem Tempo um ihre Achse. Die Folge: Die Tageslänge wächst um 1,7 Millisekunden – pro Jahrhundert. Eine winzige Veränderung zwar, die aber für grundsätzliche Aspekte der Zeitmessung ebenso relevant ist wie für die Erforschung der Prozesse, die die Drehung der Erde abbremsen. Erstaunlicherweise sind es historische Aufzeichnungen über Sonnen- und Mondfinsternisse bis zurück in die Zeit um 700 v. Chr., denen wir diese Information verdanken.

Als Basiseinheit der Zeitmessung in der Antike diente der »wahre Sonnentag«. Diese Zeitspanne zwischen zwei Meridiandurchgängen des Zentralgestirns ließ sich einfach an einer Sonnenuhr ablesen. Doch er ist alles andere als konstant. Weil die Bahn der Erde um die Sonne elliptisch und die Rotationsachse der Erde gegen ihre Umlaufbahn geneigt ist, wandert die Sonne nicht mit gleichmäßiger Geschwindigkeit über den Himmel.

Diesen Effekt kannte zwar schon der alexandrinische Gelehrte Claudius Ptolemäus. Um 150 n. Chr. berichtet er im »Almagest«, seiner berühmten mathematisch-astronomischen Abhandlung, über die »Ungleichheit der Tage«. Doch erst im 18. Jahrhundert, als sich diese mittels Pendeluhren genauer messen ließ, konnte man ein gleichmäßigeres Zeitsystem einführen: die »mittlere Zeit« oder »mean time«. Sie basiert auf dem »mittleren Sonnentag« und geht von einer gleichmäßig

über den Himmel ziehenden Sonne aus. Die mean time, die im Jahresverlauf um bis zu dreißig Sekunden vom wahren Sonnentag abweicht, machte schnell Karriere. Die mittlere Zeit im britischen Greenwich (Greenwich Mean Time, GMT) wurde 1884 zum weltweiten Standard erhoben und 1928 sogar in Universal Time (UT) umbenannt.

Allerdings hatte der Philosoph Immanuel Kant schon 1754 darauf hingewiesen, dass die von Mond und Sonne verursachten Flutberge die Rotation der Erde abbremsen müssten. Folglich wäre auch der mittlere Sonnentag veränderlich. Eine Untersuchung dieses Effekts erschien den Zeitgenossen aber kaum aussichtsreich. Wilhelm Herschel, britischer Astronom deutscher Herkunft, schrieb im Jahr 1781, dies sei erst »in einem Zeitalter« möglich, »in dem die Beobachtungen … verfeinert« sein würden. Auch noch gegen Ende des 19. Jahrhunderts betrachteten große Physiker wie die Briten Sir George Darwin, Sohn des Evolutionsforschers, und Lord Kelvin die Berechnung der Gezeitenreibung und ihres Einflusses auf die Erdrotation als große Herausforderung für die Zukunft. Erst ihr Landsmann Sir Harold Jeffreys bewältigte die Aufgabe. Auf Basis umfangreicher ozeanischer Daten ermittelte er, wie stark sich die Erdrotation verlangsamte, und kam immerhin auf ein Drittel des tatsächlichen Werts.

Rätselhaftes Phänomen? Nein: Der Sonnentag variierte!

Bis zur Bestätigung des Effekts durch präzise astronomische Messungen sollten allerdings fast zwei weitere Jahrzehnte vergehen. 1939 untersuchte Sir Harold Spencer Jones, warum sich einige Himmelskörper des Sonnensystems scheinbar ungleichförmig bewegten. Das war den Astronomen zwar schon fast hundert Jahre früher aufgefallen, doch selbst noch im Jahr 1909 hatte der berühmte amerikanische Himmelsforscher Simon Newcomb keine Erklärung für dieses »rätselhafte Phänomen«.

Die jeweiligen Irregularitäten von Sonne, Mond, Merkur und Venus, so fand Jones nun anhand von Beobachtungsdaten aus rund zwei Jahrhunderten heraus, spiegelten sich auch im Verhältnis der mittleren Geschwindigkeiten der Himmelskörper zueinander wider. Daraus zog er den Schluss, dass die Schwankungen keine physikalischen Ursachen hatten, sondern vielmehr Folge des schwankenden Zeitmaßes, nämlich des mittleren Sonnentags, waren.

Dank Jones' Ergebnissen war klar, dass die Rotation der Erde kein allzu guter Zeitmesser ist: Ihre Genauigkeit ist nicht besser als 1 zu 100 Milliarden. 1960 führte man darum die Ephemeridenzeit (Ephemeris Time, ET) ein, die inzwischen in Terrestrial Time (TT) umgetauft wurde. Weil sie auf den Gesetzen der Himmelsmechanik beruht, ist sie eine unveränderliche und von der Erdrotation unabhängige Zeitskala. Von der 1955 eingeführten Atomzeit (Atomic Time, AT) weicht sie nur um einen konstanten Faktor ab und lässt sich für alle Zeitpunkte vor diesem Jahr aus den (scheinbaren) Bewegungen von Sonne und Mond bestimmen.

Die Differenz zwischen Terrestrial Time und Universal Time, zwischen einer »idealen« und einer rotationsabhängigen Uhr, ist nun entscheidend. Dieser als ΔT (Delta T) bezeichnete Wert lässt sich als Maß für den kumulativen Effekt der Änderungen der Tageslänge verwenden. Gegenwärtig, im Jahr 2007, beträgt ΔT 68 Sekunden und wächst pro Jahr um rund eine Sekunde an. Meine Untersuchungen haben ergeben, dass ΔT in der Antike sogar mehrere Stunden betrug. (Um etwa 1820 erreicht der approximierte Verlauf von ΔT ein Minimum. Das hängt unter anderem damit zusammen, dass sowohl die Festlegung von UT als auch die von TT sich auf bestimmte Jahre bezieht, nämlich auf 1820 beziehungsweise 1900.)

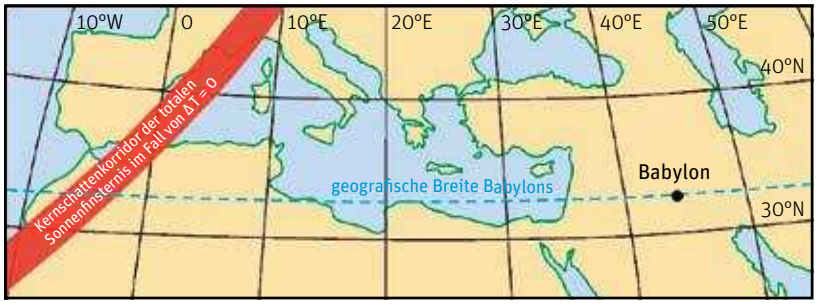
Kant, Kelvin und George Darwin hatten also Recht: Die von Mond und Sonne verursachten Gezeiten der Ozeane bremsen die Rotation der Erde ab. Auch Erdmantel und Erdatmosphäre unterliegen diesem Schwerkrafteinfluss, was ebenfalls zum Anstieg der Tageslänge beiträgt. Will man diesen Effekt berechnen, muss man auch berücksichtigen, dass die vom Mond auf der Erde erzeugten Gezeiten auf den Trabanten zurückwirken. Der Drehimpuls, der der Erde verloren geht, kann nämlich nicht einfach verschwinden. Indem der Mond ihn aufnimmt, wächst aber dessen mittlerer Abstand von der Erde um 3,8 Meter pro Jahrhundert. Dies bestätigten Messungen mit Hilfe der von den Apollomissionen dort zurückgelassenen Laserreflektoren.

Von der Erde aus gesehen scheint seine Bewegung daher um 26 Bogensekunden pro Quadratjahrhundert abgebremst zu werden. Entsprechend verlängert sich der lunare Mo-

ESA

Zehn Minuten nach dem Ende einer totalen Mondfinsternis: Das Sonnenlicht erreicht den Erdbegleiter wieder. Zur Berechnung historischer Finsternisse muss berücksichtigt werden, dass sich der Mond allmählich von der Erde entfernt.

F. RICHARD STEPHENSON



Lässt man die Verlangsamung der Erdrotation bei Berechnungen außer Acht ($\Delta T = 0$), ergibt sich, dass die totale Sonnenfinsternis am 15. April 136 v. Chr. von den Balearen aus hätte beobachtbar sein müssen. Tatsächlich aber betrug ΔT damals über drei Stunden. Der Korridor, in dem die Finsternis zu sehen war, verlief daher fast 50 Längengrade weiter östlich über Babylon.

In Kürze

- Die **Erdrotation** verlangsamt sich, dadurch verlängern sich die Tage um 1,7 Millisekunden pro Jahrhundert.
- Historische Berichte über **Sonnen- und Mondfinsternisse** etwa aus Babylonien und China ermöglichen es, dies **bis mindestens 700 v. Chr.** nachzuweisen.
- Die Ergebnisse sind für die **Zeitmessung** von Bedeutung und erlauben es auch, den Einfluss jener Prozesse zu quantifizieren, die die Rotation des Globus abbremsen.

nat alle 100 Jahre um 38 Millisekunden. Wir können davon ausgehen, dass dies in den vergangenen drei Jahrtausenden immer so war. Seither nämlich haben sich der Meeresspiegel und damit auch die Kontinentalschelfe, an denen die bremsende Wirkung der Gezeiten hauptsächlich ansetzt, kaum verändert. Die Bremswirkung war also stets gleich und damit auch der Drehimpulsübertrag auf den Mond.

Stellt man nun Berechnungen an, die sowohl die Energieerhaltung im System Erde-Mond als auch den kombinierten Effekt der von Sonne und Mond ausgelösten Gezeiten berücksichtigen, zeigt sich, dass diese Faktoren die Tage auf der Erde pro Jahrhundert um 2,3 Millisekunden länger werden lassen. Doch damit sind nur die Auswirkungen der Gezeiten berücksichtigt. Darüber hinaus führen beispielsweise wechselnde Passatwinde zu jahreszeitlichen Fluktuationen mit einer Amplitude von einer Millisekunde, wie sich dank moderner Atomuhren ermitteln ließ.

Auch ein etwa 30-jähriger Rhythmus ist bekannt, während dessen die Tage um bis zu fünf Millisekunden länger oder kürzer werden. Ermitteln ließ sich dieser dank Beobachtungen von Sternbedeckungen durch den Mond. Die entsprechenden Berichte reichen zurück bis in das frühe 17. Jahrhundert. Zu Grunde liegt diesem Rhythmus vermutlich der von Magnetfeldern bewirkte Drehimpulstransport zwischen dem flüssigen Erdkern und dem Erdmantel: Gelangt Drehimpuls nach außen, rotiert die Erde langsamer.

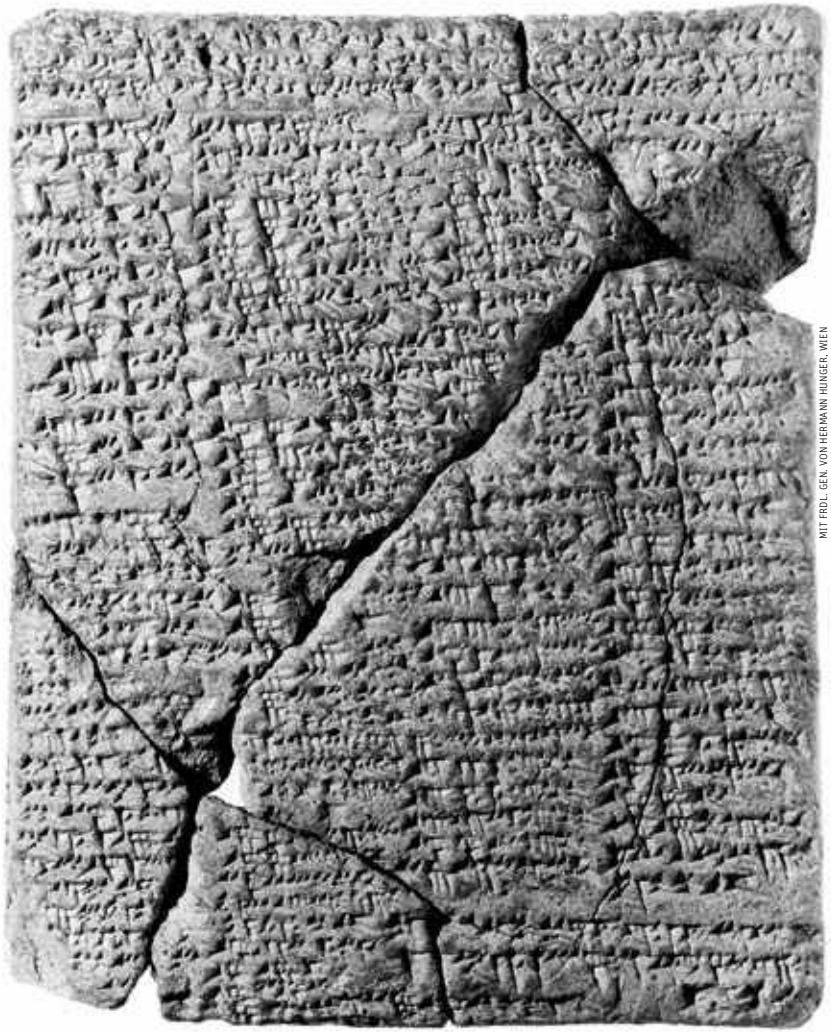
Zurück zu vorchristlichen Quellen

Was aber geschieht auf der Zeitskala im Bereich von Jahrhunderten bis Jahrtausenden? Verlässliche astronomische Daten aus der Zeit vor 1600 liegen nur für Sonnen- und Mondfinsternisse vor. Schon der Engländer Edmond Halley hatte sie im 17. Jahrhundert zur Abschätzung der Verlangsamung der Mondbewegung verwendet. Solche Ereignisse sind oft sehr beeindruckend. Bei einer Sonnenfinsternis schiebt sich, von der Erde aus gesehen, der Mond vor die Sonne, sodass diese verdunkelt wird. Mondfinsternisse hingegen entstehen, wenn der vom Sonnenlicht angestrahlte Trabant in den von der Erde geworfenen Schatten eintritt.

Die Beobachtungen dieser Himmelsphänomene lassen sich in drei Gruppen einteilen: Zeitmessungen der Hauptphasen von Sonnenfinsternissen (entscheidend ist vor allem der erste beziehungsweise letzte »Kontakt« zwischen Sonne und Mond), der Hauptphasen von Mondfinsternissen und schließlich Berichte von totalen oder fast totalen Sonnenfinsternissen ohne genaue Zeitmessungen.

»Total« ist eine Sonnenfinsternis, wenn die Sonne vom Mond völlig und nicht nur teilweise verdeckt wird, wobei natürlich jede Finsternis immer mit einer nur teilweisen Verdeckung beginnt und endet. Beobachtungen von Mondfinsternissen ohne genaue Zeitangaben sind für die Bestimmung von ΔT hingegen nicht von Nutzen, denn der Grad der Verfinsterung ist hier, anders als bei Sonnenfinsternissen, unabhängig von ΔT.

Warum aber sind die recht unpräzisen Angaben früher Astronomen überhaupt nützlich, wenn winzige Veränderungen der Tageslänge ermittelt werden sollen? Gehen wir einmal für die vergangenen 2700 Jahre von einer mittleren Zunahme der Tageslänge um zwei Millisekunden pro Jahrhundert aus. Selbst im Jahr



MIT FRDL. GEN. VON HERMANN HUNGER, WIEN

Blick in die Zukunft. Die Tontafel aus der Seleukidenära hält astronomische Ereignisse fest, die über Babylon zu sehen waren. Der Bericht über eine Sonnenfinsternis am 15. April 136 v. Chr. und weitere Mond-, Sonnen- und Planetendaten zu verschiedenen Zeitpunkten diente der Vorhersage von Himmelsereignissen im Jahr 119/118 v. Chr.

Eurofighter-Simulation:
Luftkampf in der Halle

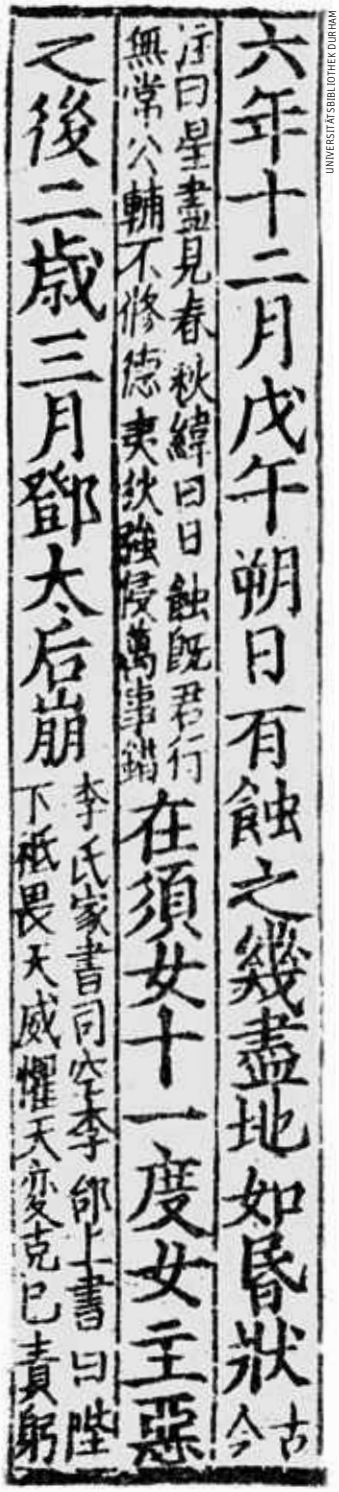
Foto: Petersen

Außerdem in der neuen ***FLUG REVUE***:
16 Extra-Seiten gratis! Alles über die Triebwerke der Zukunft sowie eine aktuelle Marktübersicht der zivilen Luftfahrtantriebe.

FLUG REVUE
Die ganze Welt der Luft- und Raumfahrt

www.flugrevue.de

Jetzt im Handel!



UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK DURHAM

Tödliche Verfinsterung? Die hier beschriebene fast totale Sonnenfinsternis am 18. Januar 120, bei der es »auf der Erde wie Abenddämmerung« war, erwies sich als böses Omen. Dem chinesischen Text aus der Späten Han-Dynastie zufolge verstörte sie die kaiserliche Witwe so sehr, dass sie zwei Jahre und drei Monate später starb.

700 v. Chr. wären die Tage dann lediglich 54 Millisekunden kürzer gewesen als heute. Zeitpunkte ließen sich damals aber höchstens auf auf 10 bis 15 Minuten genau bestimmen.

Seit 700 v. Chr. sind indessen rund eine Million Tage vergangen, jeder davon im Mittel 27 Millisekunden (die Hälfte von 54 Millisekunden) kürzer als heutige Tage. In dieser Zeit hätte eine UT-Uhr gegenüber einer idealen TT-Uhr insgesamt rund sieben Stunden verloren! Diese recht große Differenz lässt sich auch auf Basis vergleichsweise simpler Messungen nachweisen, zumal man ΔT-Werte in der Praxis aus einer Vielzahl individueller Beobachtungen ermittelt.

Mehrere hundert Beobachtungen aus der Zeit von 700 v. Chr. bis 1600 n. Chr. haben sich als brauchbar für die Bestimmung von ΔT herausgestellt. Sie stammen fast ausschließlich aus dem antiken Babylon (etwa 700 bis 50 v. Chr.), dem antiken und dem mittelalterlichen China (vor allem zwischen 200 v. Chr. und 1600 n. Chr.), dem antiken und mittelalterlichen Europa (etwa 400 v. Chr. bis 1600 n. Chr.) und der mittelalterlichen arabischen Welt (etwa 800 bis 1200 n. Chr.). Aus der Zeit vor 700 v. Chr. liegen lediglich vereinzelte und unzuverlässige Quellen vor.

Jeder dieser Berichte erfüllt vier voneinander unabhängige Kriterien: Er entstammt einer zuverlässigen Quelle, enthält den eindeutigen Hinweis auf eine Finsternis, gibt ein akkurates Datum und schließlich auch den Ort der Beobachtung an. Zeitangaben sind besonders hilfreich. Sie sind stets in wahrer Sonnenzeit angegeben und lassen sich bei bekannter geografischer Länge des Beobachtungsorts einfach in die mittlere Sonnenzeit UT umrechnen. Nach computergestützter Berechnung der TT-Werte muss man nur noch die Differenz bilden, um ΔT zu erhalten.

Mancher Bericht indessen ist auch ohne genaue Zeitangaben wertvoll. Gelegentlich nämlich hatten die frühen Astronomen das seltene Glück, eine totale Sonnenfinsternis zu erleben. Dazu kommt es an jedem geografischen Ort nur rund dreimal in einem Jahrtausend. Und wenn sie sorgfältig genug berichteten, lassen sich auf Basis qualitativer Beschreibungen zwar keine diskreten Werte, aber immerhin Grenzen ermitteln, zwischen denen der Wert für ΔT liegen muss. Ähnliches gilt für Finsternisse, die die Totalität ganz knapp verfehlten.

Ein Teil der Berichte stammt aus Babylonien. Ptolemäus zitiert im »Almagest« babylonische Finsternis-Aufzeichnungen aus den Jahren 721 bis 382 v. Chr. Hauptquelle jedoch sind die »Late babylonian astronomical texts« (LBAT): Tontafeln, auf denen offizielle

PLANETARIUM ZÜRICH

Beobachtungen totaler Sonnenfinsternisse sind sogar dann hilfreich, um Veränderungen der Tageszeit in der Vergangenheit zu bestimmen, wenn keine genauen Zeitangaben vorliegen.

Astronomen der Hauptstadt ihre Beobachtungen in einer Silbenkeilschrift festhielten. Deren Übersetzung wurde erst kürzlich durch Hermann Hunger von der Universität Wien abgeschlossen. Er hatte das Werk des verstorbenen Abraham J. Sachs vervollständigt und neu herausgegeben.

Das Datum lässt sich rekonstruieren

Die Babylonier, die wahrscheinlich Wasseruhren zur Zeitbestimmung verwendeten, überwachten Himmelsereignisse vor allem dann, wenn Mond, Sonne oder Planeten beteiligt waren, notierten aber zum Beispiel auch das Auftauchen des Halleyschen Kometen in den Jahren 164 und 87 v. Chr. Sonnen- und Mondfinsternisse verfolgten sie regelmäßig und gaben für die verschiedenen Phasen den jeweils nächstgelegenen »US« an (die babylonische Bezeichnung lässt sich etwa mit »Zeitgrad« übersetzen). Jeder Tag war in 360 US eingeteilt, sodass ein US vier Minuten entspricht. Wenig Schwierigkeiten bereitet das Datum: Für die Umrechnung des babylonischen Kalenders in sein julianisches Pendant gibt es bequeme Tabellen. Vergleicht man die so ermittelten Datumsangaben aus den LBAT mit berechneten Daten für astronomische Ereignisse, so stimmen sie gewöhnlich exakt überein. Selbst wenn das Datum fehlt, lässt es sich häufig aus den astronomischen Informationen rekonstruieren.

Die bei Weitem detailliertesten der überlieferten Berichte beschäftigen sich mit der totalen Sonnenfinsternis des Jahres 136 v. Chr., die über Babylon zu beobachten war. Zwei (fragmentarische) Texte, die unabhängig voneinander darüber berichten, wurden von Sachs und Hunger in dieser Übersetzung zusammengeführt:

Sichern Sie sich die neue ZEIT WISSEN Edition in 6 Bänden!

Wissen, das die Welt erklärt.

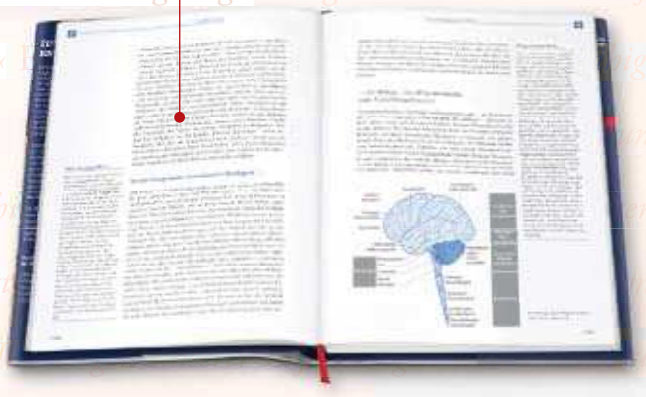
Jetzt bestellen: 1 Band gratis!
Bei Bestellung der ganzen Reihe

Wer ist »Ich«? Haben nur wir ein Bewusstsein? Ist das Universum unendlich? Die neue ZEIT WISSEN Edition eröffnet neugierigen Lesern die Welt der Wissenschaft auf völlig neue Weise. Forscher und Journalisten – alle ausgewiesene Autoritäten ihres Fachs – geben in dieser neuen Wissensbuchreihe verständlich und anschaulich Einblick in die aktuellen wissenschaftlichen Fragen unserer Zeit. So stillt die 6-teilige ZEIT WISSEN Edition Wissensdurst und Leselust zugleich.

Diese außergewöhnliche Buchreihe ist eine Gemeinschaftsproduktion von ZEIT und Spektrum Akademischer Verlag.

Gehen Sie mit der ZEIT WISSEN Edition auf sechs spannende Entdeckungsreisen, und bauen Sie Ihr Wissen alle 3 Monate mit einem neuen Band weiter aus. So sind Sie immer auf dem aktuellen Forschungsstand. Den Auftakt macht Band 1 »Rätsel Ich«.

Information und Lesegenuss:
ca. 300 Seiten pro Band, Hardcover mit Schutzumschlag und Lesebändchen, ca. 100 Abbildungen, ca. 120 Infoboxen und Kurzportraits.



Ihre Vorteile auf einen Blick

- **Günstig:** Sie erhalten diese einzigartige Buchreihe zu einem erstaunlich günstigen Preis: Sie zahlen nur € 20,75 pro Band statt € 24,95 im Einzelkauf!
- **Exklusiv:** ZEIT- oder ZEIT WISSEN-Abonnenten sparen die Versandkosten in Höhe von € 9,90!
- **Geschenk:** Bei Bestellung bis zum 15.11. erhalten Sie zusätzlich die ZEIT CD-ROM »WISSEN« im Wert von € 29,– !
- **Risikolos:** Sie haben 14-tägiges Rückgaberecht.

Coupon bitte ausfüllen und umgehend senden an:
DIE ZEIT-Sondereditionen, 74569 Blaufelden, oder faxen an 07953/88 35 09 · Telefon: 0180/545 56 06* · E-Mail: zeitshop@zeit.de

*14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz/Mobilfunkpreise können abweichen

Ja, ich möchte mir die komplette ZEIT WISSEN Edition sichern und 25,20 € sparen.

Bitte liefern Sie mir alle 6 Bände der ZEIT WISSEN Edition. Ich zahle pro Band nur € 20,75. Das sind € 124,50 für die gesamte Edition zuzüglich der Versandkosten von € 9,90 (ZEIT- und ZEIT WISSEN-Abonnenten zahlen keine Versandkosten). Die Zahlung erfolgt pro gelieferten Band, und Lieferung geschieht in Teilaussendungen. Bei sofortiger Bestellung erhalte ich die ZEIT CD-ROM »WISSEN«** gratis dazu. Angebot nur gültig in Deutschland und solange der Vorrat reicht. Auslandspreise auf Anfrage.

Sie wollen die Bände lieber einzeln bestellen? Einfach anrufen unter 0180/545 56 06*, im Internet unter www.zeit.de/editionen oder auch im Buchhandel erhältlich.

Zahlungsweise: ☐ Ich zahle bequem per Bankeinzug jeweils die gelieferte Anzahl Bände. ☐ Ich zahle per Rechnung jeweils die gelieferte Anzahl Bände. ☐ Ich bin ZEIT-Abonnent und spare € 9,90 Versandkosten.

Name, Vorname

Straße/Hausnummer

Postleitzahl | Wohnort

Telefon | E-Mail

Bankleitzahl

Kontonummer

Bestellcode: ZW2516

Geldinstitut

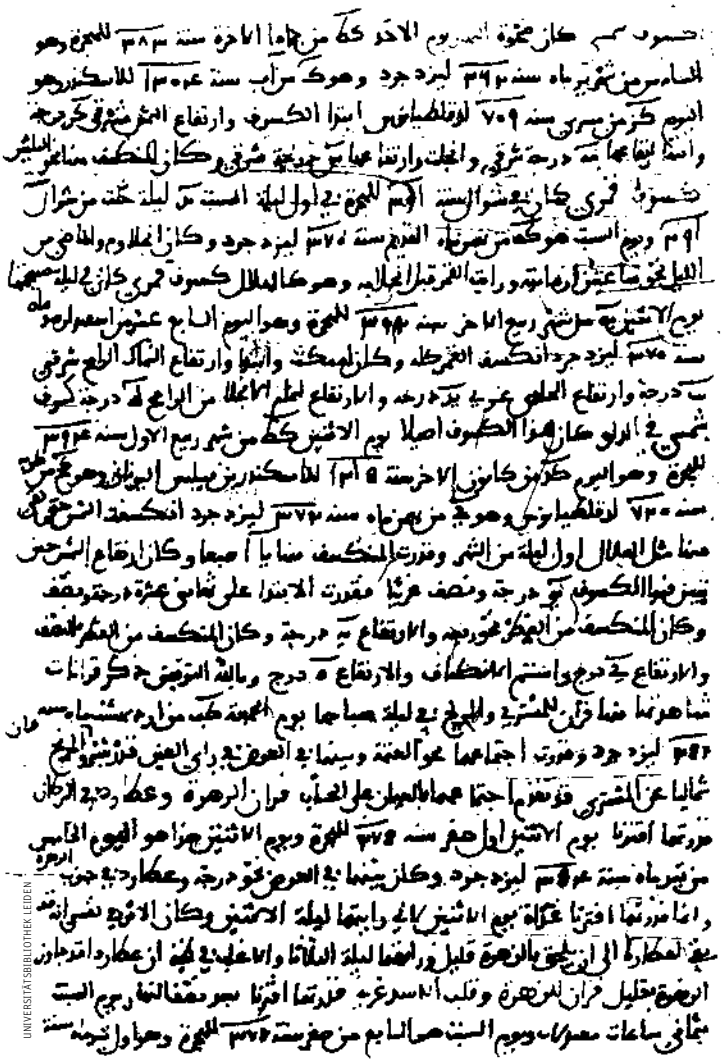
Datum | ✗ Unterschrift

**Nur bei Bestellung bis zum 15.11.2007.

Widerrufsrecht: Die Bestellung kann ich innerhalb der folgenden 14 Tage ohne Begründung beim ZEIT-Sondereditionen-Service in Textform (z.B. Brief oder E-Mail) widerrufen. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung meiner Nachricht. Die ZEIT WISSEN Edition wird herausgegeben vom Zeitverlag Gerd Bucerius GmbH & Co. KG, Buceriusstraße, Eingang Speersort 1, 20095 Hamburg. Geschäftsführer Dr. Rainer Esser. Sitz und Registergericht Hamburg HRA 91123.

www.zeit.de/editionen

Genießen Sie DIE ZEIT



UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK LEIDEN

Der 1008 verstorbene große Astronom Ibn Yunus aus Kairo beschreibt hier vier Sonnen- beziehungsweise Mondfinsternisse der Jahre 993 bis 1004. Das gezeigte Blatt entstammt einer frühen Kopie seines berühmtesten Werks, des »al-Zij al-Hakimi al-kabir«.

»(Jahr) 175, Monat XII/2. Der 29. (Tag) um 24 Zeitgrad nach Sonnenaufgang, Sonnenfinsternis; als sie auf der Südwestseite begann, um 18 Zeitgrad des Tages, war sie vollständig total; Venus, Merkur und die Normalen Sterne waren sichtbar; Jupiter und Mars, die sich in ihrer Periode der Nichtsichtbarkeit befanden, waren während dieser Finsternis sichtbar. Sie warf (den Schatten) von Südwesten nach Nordosten; 35 Zeitgrad (dauerten) Anbruch, maximale Phase und Lichtung.«

Das Jahr ist hier relativ zum Beginn der Seleukidischen Ära in den Jahren 312/311 v. Chr. angegeben. Umrechnungstabellen und astronomische Berechnungen der Finsternis führen beide auf dasselbe julianische Datum: den 15. April 136 v. Chr. Die Berechnung der lokalen wahren Zeit des Sonnenaufgangs liefert 5:56 Uhr (wie auch im Folgenden sind hier nicht 56 Minuten gemeint, sondern 56 Hundertstel einer Stunde), entsprechend 2:53 Uhr UT. Damit lässt sich der UT-Zeitpunkt der drei gemessenen Finsternisphasen zu 4:19 Uhr, 5:39 Uhr und 6:52 Uhr bestimmen. Die TT-Zeitpunkte lassen sich entsprechend zu 7:69 Uhr, 8:76 Uhr und 9:93 Uhr berechnen. Für ΔT ergeben sich damit drei Werte: 3:50, 3:37 und 3:41 Stunden, also ein Mittelwert von 3:43 Stunden.

Sogar eine Gegenprüfung ist möglich. Weil eindeutig eine totale Finsternis beschrieben wird, lassen sich strenge Grenzen für den Wert von ΔT gewinnen: Für eine Totalität in Babylon muss der Wert zwischen 3:11 und 3:38 Stunden liegen. Beobachtungen wie diese, deren bemerkenswerte Selbstkonsistenz von großer Sorgfalt der Beobachtung zeugt, sind kein Einzelfall. Tatsächlich können wir die Variation von ΔT zwischen 700 und 50 v. Chr. auf Basis babylonischer Daten mit tolerierbarer Genauigkeit verfolgen.

In China sind die Berichte aus solch frühen Epochen unergiebiger. Für den Zeitraum von 720 bis 480 v. Chr. finden wir in einer einzigen frühen Chronik namens »Chunqiu« (Frühlings- und Herbstannalen) 36 Sonnenfinsternisse verzeichnet. In den Jahrhunderten danach sind nur wenige Finsternisse überliefert. Systematische Beobachtungen gibt es hier wohl erst ab etwa 200 v. Chr., dem Beginn der Han-Dynastie. Doch von da an berichteten die Astronomen des Reichsobservatoriums, deren zusammengefasste Berichte oft in die offiziellen Geschichtsschreibungen aufgenommen werden, regelmäßig und mit hoher Genauigkeit über alle Arten von Himmelsphänomenen: über Kometen, Meteore, Novae und Supernovae, die Bewegung von Mond und Planeten – und über die astrologisch besonders bedeutsamen Sonnenfinsternisse. Mondfinsternissen indessen galt größeres Interesse erst ab 500 n. Chr. Auch sorgfältige Zeitmessungen mit Hilfe von Wasseruhren sind erst ab dieser Zeit überliefert. Doch für die Zeit bis 1300 n. Chr. erlauben die vielen vorliegenden Daten, ΔT mit guter Genauigkeit zu bestimmen.

Enten kehrten in die Ställe zurück

Als Zeiteinheit diente den Chinesen das »ke«, mit dem man vermutlich kleine Gravuren auf den Uhren bezeichnete. 100 ke entsprachen einem Kalendertag, 1 ke ist also eine knappe Viertelstunde. Im 5. und 6. Jahrhundert wurden Mondfinsternisse aber auch in Bezug auf die fünf »geng« oder Nachtwachen gemessen. Ein schönes Beispiel ist die Mondfinsternis vom 21. Januar 585, die in der Kalenderabhandlung des Suishu, der offiziellen Geschichtsschreibung der Sui-Dynastie (581–616), enthalten ist. »Kaihuang-Regierungszeit, 4. Jahr, 12. Monat, 15. Tag guimao (40. Tag des Zyklus) … Im ersten Teil der ersten Wache begann sich (der Mond) am nordöstlichen Rand zu verfinstern. Er war zu 10/15 (verfins-

tert); im vierten Teil begann er sich zu erholen. Zum ersten Teil der zweiten Wache war seine Fülle wieder hergestellt.« Der Mittelwert für ΔT ergibt sich hier zu 1:74 Stunden.

Detailreich ist auch die Sonnenfinsternis am 25. Juni 1275 beschrieben, die in die Song-Dynastie (960–1297) fiel: »Deyou-Regierungszeit, 1. Jahr, 6. Monat, Tag gengzi (37. Tag des Zyklus). Die Sonne war verfinstert, es war total. Himmel und Erde waren in Dunkelheit. Menschen konnten aus einem Fuß Abstand nicht erkannt werden. Die Hühner und die Enten kehrten in ihre Ställe zurück. Es dauerte von der (Doppel-)Stunde si (9 bis 11 Uhr) bis zur Stunde wu (11 bis 13 Uhr); dann erlangte sie ihre Helligkeit wieder.« ΔT ergibt sich hier zu maximal 0:36 Stunden.

Wie ein goldener Ring

Auch partielle Finsternisse, bei denen ein großer Teil der Sonne bedeckt war – der unbedeckte Teil habe dann »wie ein Haken« ausgesehen –, finden sich in den chinesischen Aufzeichnungen. Eine ringförmige Finsternis indessen ist nur einmal überliefert, wohl darum, weil solche Ereignisse nur selten besonders beeindruckend sind. »Wie ein goldener Ring« erschien die Sonne damals, heißt es in einer Aufzeichnung aus dem Jahr 1292.

Uneinheitlich ist der überlieferte Bestand auch in Europa. Der »Almagest« zitiert griechische Beobachtungen von Mondfinsternissen aus der Zeit von 200 v. Chr. bis 136 n. Chr. Zudem erwähnen römische und griechische Schriftsteller wie Livius, Thukydides und Plutarch Finsternisse in ihren Werken. Viele dieser Beobachtungen sind jedoch von zweifelhafter Zuverlässigkeit. Insbesondere findet sich nur selten eine eindeutige Beschreibung einer totalen Sonnenfinsternis.

Die wertvollsten Finsternisbeobachtungen vor der Erfindung des Fernrohrs enthalten zweifellos die mittelalterlichen Chroniken europäischer Klöster und Städte, hauptsächlich aus der Zeit von 800 bis 1500 n. Chr. Gelehrte wie der Italiener Ludovico Muratori im 18. und der Deutsche Georg Pertz im 19. Jahrhundert veröffentlichten sehr viele dieser Chroniken, in denen totale Sonnenfinsternisse bis weit in das 18. Jahrhundert hinein verzeichnet sind. Ihre Zahl ist im Vergleich zu anderen Quellen weltweit unübertroffen.

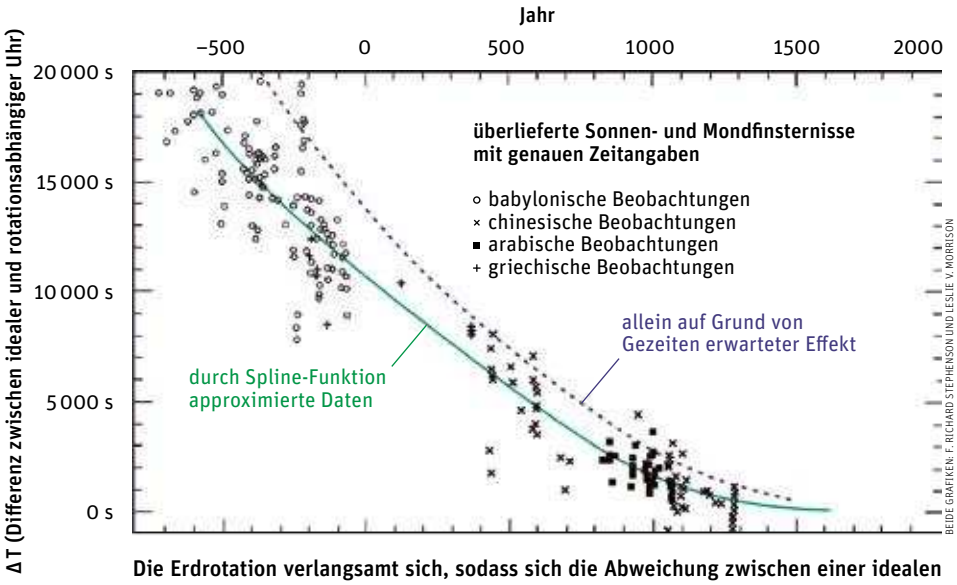
Erhalten sind aber auch etliche genaue Augenzeugenberichte. Viele von ihnen hatte der Österreicher Friedrich Ginzel im späten 19. Jahrhundert zusammengetragen. In den »Notae Halesbrunnenses« etwa, einer Chronik des Klosters im bayrischen Heilsbronn, findet sich die Beschreibung der totalen Sonnenfinsternis am 2. August 1133: »Im Jahr 1133 der Fleischwerdung unseres Herrn … Am 4. Tag vor den Nonen des August (2. August), dem 4. Tag der Woche (Mittwoch), als der Tag sich neigte, wurde die Sonne um die neunte Stunde in einem einzigen Augenblick so schwarz wie Pech. Der Tag verwandelte sich in Nacht, viele Sterne waren sichtbar, Gegenstände am Boden sahen aus wie sonst in der Nacht …« Auch diese Angaben genügen: ΔT betrug damals zwischen 0:09 und 0:44 Stunden.

Kaum ergiebig sind indessen die Messungen, die europäische Astronomen wie Levi ben Gerson, Regiomontanus, Bernard Walther und Tycho Brahe zwischen 1300 und 1600 bei Sonnen- und Mondfinsternissen vornahmen. Für die genaue Bestimmung von ΔT, das in dieser Epoche nicht einmal mehr 500 Sekunden betrug, hätte die Genauigkeit der Beobachtungen größer sein müssen. Ein bemerkenswert präzises Ergebnis für ΔT liefert aber überraschenderweise eine Beobachtung ohne Zeitangaben von Christopher Clavius.

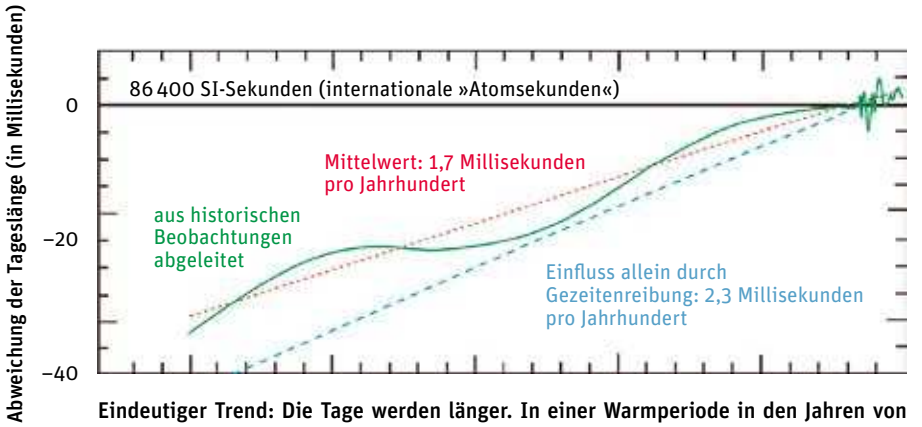
MIT FRDL. GEN. VON NHA IL-SEONG, SEOUL

Auch aus Korea sind astronomische Beobachtungen überliefert. Der Cheomseongdae-Turm bei Kyeongju nahe dem südkoreanischen Busan wurde 647 n. Chr. errichtet und ist wahrscheinlich das älteste noch erhaltene Observatorium in ganz Ostasien.

Der deutsche Mathematiker, der auch wesentlich an der Entwicklung des gregorianischen Kalenders beteiligt war, hatte sie 1567 in Rom gemacht. Am 9. April wurde Clavius Zeuge einer Finsternis, bei der der Mond »die Sonne nicht vollständig verdeckte …, vielmehr blieb ein gewisser schmaler Kreis der Sonne übrig, der den gesamten Mond auf allen Seiten umgab«. Bei dieser Finsternis, so kann man zeigen, waren die Winkeldurchmesser von Sonne und Mond praktisch identisch. Berücksichtigt man auch das ungleichmäßige Profil des Mondrands, so kommt man auf ΔT-Werte zwischen 145 und 165 Sekunden.



Die Erdrotation verlangsamt sich, sodass sich die Abweichung zwischen einer idealen und einer rotationsabhängigen Uhr verändert. Die grüne Kurve nähert die Daten an und berücksichtigt auch Informationen, die sich aus Finsternissen ohne genaue Zeitangaben ergeben. Die Bremswirkung allein durch die Gezeitenreibung (gestrichelte Kurve) wird durch gegenläufige Effekte offenbar abgemildert.



Eindeutiger Trend: Die Tage werden länger. In einer Warmperiode in den Jahren von 900 bis 1300 geschah dies sogar besonders schnell. Die grüne Kurve ist aus historischen Daten abgeleitet, der Mittelwert (rote Linie) der Zunahme der Tageslänge liegt bei 1,7 Millisekunden pro Jahrhundert. Allein aus den Gezeitenwirkungen (blau) würden sich 2,3 Millisekunden pro Jahrhundert ergeben. Werte aus der Zeit nach 1600 verdanken wir hauptsächlich teleskopischen Beobachtungen von Sternbedeckungen durch den Mond. Die starken Schwankungen, die mit modernen Methoden in neuerer Zeit gemessen wurden, traten vermutlich auch früher auf, beweisen lässt sich dies allerdings nicht mehr.

In der arabischen Welt war es insbesondere der Zeitraum zwischen 830 und 1020 n. Chr., in dem Astronomen vor allem von Bagdad und Kairo aus zahlreiche Finsternisse vermaßen. Sie bestimmten die Zeiten der verschiedenen Finsternisphasen indirekt, indem sie – üblicherweise mit Hilfe eines Astrolabiums – die Höhe der Sonne, des Monds oder eines hellen Sterns über dem Horizont maßen. Am 1. Mai 1002 berichtet der Astronom Ibn Yunus: »Die Finsternis ereignete sich in der Nacht, deren Morgen der 15. des Monats von Rabi'al-Akhir im Jahre 392 von al-Hijrah war … Der Mond war vollständig verfinstert … Die Finsternis begann, als die Höhe (des Sterns) al-ramih (Arkturus) 52 Grad im Osten und die Höhe (des Sterns) al-hade (Kapella) 14 Grad im Westen war. Die Höhe al-ramih war 35 Grad, als (die Finsternis) vollständig beseitigt war.«

Aus der Höhe der Sterne zu Beginn der Finsternis lässt sich die lokale Zeit zu 23:48 Uhr beziehungsweise 23:55 Uhr berechnen. Nach den üblichen Rechenschritten ergibt sich ΔT zu 1750 beziehungsweise 1950 Sekunden. Offensichtlich jedoch enthalten die Angaben einen Fehler. Arkturus erreichte die Höhe von 35 Grad nämlich erst 40 Minuten nach Sonnenaufgang – und wäre dann unsichtbar gewesen.

Fast immer aber führt die Analyse der überlieferten Berichte zu zuverlässigen Ergebnissen. Ob Finsternisbeobachtungen mit Zeitangaben oder Berichte über totale Sonnenfinsternisse ohne Zeiten: Beide Kategorien von Quellen liefern erstaunlich ähnliche Resultate für ΔT. Gibt man die Zeit in Jahrhunderten relativ zum Referenzjahr 1820 an (mit Bezug auf diese Zeit wurde die ET-Uhr justiert), so repräsentiert die Gleichung $\Delta T = 32\ t^2$ Sekunden beide Datensätze gleich gut. Berücksichtigt man allein die Gezeiten, lautet sie $\Delta T = 42\ t^2$ Sekunden.

Bei einer Approximation mit Hilfe kubischer Spline-Funktionen hingegen werden Abweichungen von der Parabelform deutlich. Passt man diese Funktionen an die mit Hilfe von Zeitangaben ermittelten diskreten ΔT-Werte an und sorgt dafür, dass sie zugleich alle Grenzen für ΔT erfüllen, so zeigen sich Abweichungen um bis zu 500 Sekunden. Dem durch die Gezeiten ausgelösten Haupttrend haben sich im Verlauf der letzten 2700 Jahre also ausgeprägte andere Einflüsse überlagert, die selbst wieder zeitlich veränderlich waren.

Insgesamt deuten die historischen Daten auf eine mittlere Zunahme der Tageslänge seit 700 v. Chr. um 1,7 Millisekunden pro Jahrhundert hin. Gegenüber dem allein aus der

WERNER FORMAN ARCHIVE / BRITISH MUSEUM

Als Messinstrumente noch Kunstwerke waren: Dieses Astrolabium aus Kupfer entstand im Jahr 1236 n. Chr. in Kairo und wurde von Astronomen benutzt, um zum Beispel die Höhe von Sternen über dem Horizont zu bestimmen.

Gezeitenwirkung erwarteten Wert von 2,3 ergibt sich also eine Differenz von 0,6 Millisekunden pro Jahrhundert. Deren größter Teil geht vermutlich auf den noch immer voranschreitenden Anstieg der Landmassen zurück, die in der letzten Eiszeit vergletschert waren. Dadurch verringert sich die Abplattung der Erdkugel und damit ihr Trägheitsmoment. Dieser Effekt wirkt der Rotationsverlangsamung entgegen. Satellitenmessungen haben ihn zu etwa 0,5 Millisekunden pro Jahrhundert und damit in guter Übereinstimmung zu den Ergebnissen der historischen Untersuchungen bestimmt.

Starke Bremswirkung durch warme Jahrhunderte

Berechnet man die erste Ableitung der Spline-Funktionen, liefern die Daten noch weitere interessante Ergebnisse. So scheint die Tageslänge mitunter mehrere Jahrhunderte lang unverändert geblieben zu sein, während sie zu anderen Zeiten doppelt so schnell wie im Mittel anstieg. Für die Jahre von 900 bis 1300 n. Chr., aus denen viele gute Daten vorliegen, lässt sich ein solch besonders schneller Anstieg der Tageslänge dokumentieren.

Und tatsächlich legen auch Aufzeichnungen jener Zeit eine Periode globaler Erwärmung nahe. Während das schmelzende Polareis auf Grund seiner Nähe zur Rotationsachse der Erde ohne Einfluss blieb, stieg der Meeresspiegel weltweit, und somit entfernten sich die Wassermassen von der Achse – die Rotation wurde dadurch noch stärker verlangsamt als ohnehin durch die Gezeiten. Dies genauer zu quantifizieren, wäre allerdings tatsächlich eine schwierige Aufgabe. ◁

Der emeritierte Professor **F. Richard Stephenson** lehrte Physik an der britischen University of Durham. Derzeit forscht er dort im Rahmen eines zweijährigen Fellowship am Department für Ostasienstudien. Sein wissenschaftliches Interesse gilt vor allem der historischen Astronomie, insbesondere in chinesischen Überlieferungen.

Historical eclipses and Earth's rotation. Von F. Richard Stephenson in: Cambridge University Press, 1997, ISBN 0-521-46194-4

Der Schatten des Mondes bringt es an den Tag. Von Marcus Chown in: Spektrum der Wissenschaft 8/1999, S. 50

http://www.iers.org – International Earth Rotation and Reference Systems Service der International Astronomical Union

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/903046

wichtige**online**adressen

academics.de –
das Karriereportal der Wissenschaft
www.academics.de

arceoTon –
der Podcast zur Archäologie
www.arceoton.de

ingenieurkarriere.de –
der Stellenmarkt für Ingenieure
www.ingenieurkarriere.de

Kernmechanik –
Optimiertes Modell: Kernspin + Dipolmomente
www.kernmechanik.de

Schwebestative für Profis und Amateure
Handgeführte und körpergestützte Systeme
STEADYDRIVE Balance Systems Ltd.
www.steadydrive.com

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

DER GEDÄCHTNIS-KODE

In Zahlenfolgen von Nullen und Einsen lassen sich die Hirnaktivitäten bei der Gedächtnisbildung übersetzen. Im Gehirn von Mäusen können Forscher damit schon lesen.

BEARBEITUNG: TOM DRAPER DESIGN; FOTO: IMAGESHOP

Wissenschaftler erkennen immer genauer, wie das Gehirn Erinnerungen ablegt. Ganz ähnlich sollte, so vermuten sie, das Denken funktionieren. Jetzt hoffen Neurobiologen, mit diesem Kode eines Tages Gedanken zu lesen. Auch klügere Computer und Roboter sollten sich nach dem gleichen Prinzip bauen lassen.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

Von Joe Z. Tsien

Wer einmal ein Erdbeben erlebt hat, erinnert sich auch Jahre später noch ganz deutlich: an das Schwanken und Zittern unter den Füßen, das Rumpeln und den Krach, wenn der Boden sich wölbt und aufbricht, wenn Wände und Fensterscheiben zerbersten, sowie daran, wie der Inhalt von Schränken und Regalen durchs Zimmer fliegt.

Solche eindringlichen Szenen behalten wir deswegen so lebhaft im Gedächtnis, weil unser Gehirn auch und gerade zu dem Zweck entstanden ist, herausragenden Ereignissen Information abzugewinnen, um sie künftig in ähnlichen Situationen zu nutzen. Aus Erfahrung lernen in gewissem Maß alle Tiere. Nur deshalb kommen sie überhaupt in einer veränderlichen, komplexen Welt zurecht.

Wie Erinnerungen gespeichert werden und wie sich daraus ein Gedächtnis aufbaut, versuchen Neurowissenschaftler seit Jahrzehnten herauszufinden. Meine Kollegen und ich haben nun bei Mäusen einen Zusammenhang entdeckt, den wir für den grundlegenden Mechanismus des Gehirns halten, über den es dem Erfahrenen lebenswichtige Information entnimmt und als Gedächtnisinhalt speichert. Unsere Ergebnisse passen gut zu bisherigen Befunden, nach denen Phänomene wie Wahrnehmung oder Erinnerung die koordinierte Aktivität großer Nervenzellpopulationen erfordern. Früher stellten sich Forscher gern vor, dass dergleichen im Gehirn durch lineare Signale von einer Nervenzelle zur nächsten repräsentiert sein könnte. Mittlerweile zeichnet sich aber ab, dass solche Modelle den Erscheinungen nicht gerecht werden (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 6/2007, S. 50).

Nach unseren Ergebnissen scheinen die Neuronenpopulationen, die beim Verschlüsseln (Enkodieren) von Gedächtnisinhalten mitwirken, noch anderes zu leisten: Ihnen verdanken wir offenbar auch jene allgemeinen Konzepte, mit denen wir aus alltäglichen Erfahrungen Wissen und Ideen gewinnen. Damit nähert sich die Forschung zugleich dem allgemeinen Kode des Gehirns – nämlich den noch nicht bekannten Regeln, nach denen die elektrischen Impulsmuster in Wahrnehmung, Gedächtnis, Wissen und letztlich Verhalten umgesetzt werden. Aus solchen Regeln könnten wir lernen, fast nahtlose Hirn-Maschine-Verbindungen (Interfaces) zu konstruieren. Auch dürfte das Verständnis des Hirnkodes den Weg ebnen für eine neue Generation intelligenter Computer und Roboter. Vorstellbar ist sogar eine Art Kodebuch fürs Denken, ein Schlüssel, mit dem man an sichtbar gemachter – in Kodes übersetzter – neuronaler Aktivität herausfinden kann, woran sich jemand erinnert und was er denkt.

Der Klugheit auf der Spur

Den Anstoß, sich mit dem Gehirnkode zu befassen, gab unserer Arbeitsgruppe die Genmaus Doogie. So – nach der Hauptfigur einer Fernsehserie – nannten wir die gentechnisch veränderten, besonders schlauen Mäuse, deren Zucht uns im Jahr 1999 gelang. Wir forschten damals über molekulare Grundlagen von Lernen und Gedächtnis. Doogie-Mäuse lernen schneller und behalten Zusammenhänge länger als der Wildtyp (Spektrum der Wissenschaft 7/2000, S. 36). Unsere klugen Mäuse erregten in Wissenschaft und Öffentlichkeit einiges Aufsehen. Was aber war bei den Tieren anders? Wir begannen zu überlegen, was »Gedächtnis« überhaupt ist. Vieles wusste die Wissenschaft schon darüber. So war bekannt, dass eine innere Struktur des Großhirns, der Hippocampus, bei dem Vorgang notwendig ist, Erlebtes in ein langfristiges Gedächtnis zu überführen. Wir kannten auch entscheidende der beteiligten Moleküle – wie den so genannten NMDA-Rezeptor. Ihn hatten wir beim Doogie-Stamm verändert. Doch wie Gedächtnis im Gehirn repräsentiert ist, nach welchem Prinzip die Hirnzellen – die Neuronennetze – dabei aktiviert sind, war so genau nicht klar.

Vor ein paar Jahren überlegte ich, ob es uns gelingen könnte, den neuronalen Kode des Gedächtnisses mit mathematischem und physiologischem Rüstzeug zu entschlüsseln:

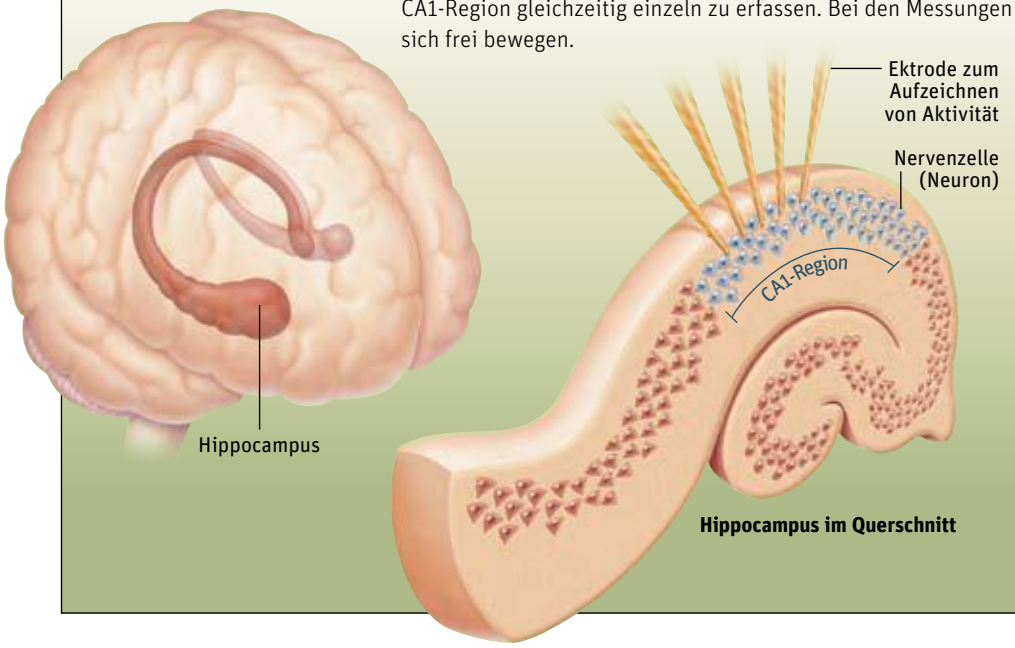
- Nach welchen grundlegenden Regeln richten sich die Neuronennetze beim Speichervorgang?
- Lässt sich das begleitende Aktivitätsmuster aufzeichnen?

In Kürze

- **Wenn das Gehirn** aus Erlebnissen Gedächtnisinhalte macht, agieren große Nervenzell-(Neuronen-)populationen im Verband.
- Eine zentrale **Struktur der Gedächtnisbildung** ist der Hippocampus. Dortige Zellen formieren sich zu »neuronalen Cliquen«. Das sind feste Fraktionen von Neuronenpopulationen, die auf bestimmte, teils generelle, teils spezifische Aspekte eines gegebenen Erlebnisses ansprechen. Somit bilden die Cliquen die Teilaspekte eines Gedächtnisinhalts auf verschiedenen hierarchischen Ebenen ab.
- In gleicher Weise könnten auch jene **Hirnvorgänge** organisiert sein, die mit Wahrnehmung, Wissen, Denken und Verhalten zu tun haben. Die Neurowissenschaftler glauben, dass sie immer dichter an das Ziel herankommen, den allgemeinen neuronalen Kode zu entschlüsseln – die Regeln, wie das Gehirn Erfahrungen erkennt und ihnen Bedeutung verleiht.
- **Die Aktivitäten von neuronalen Cliquen** haben der Autor und seine Mitarbeiter in einen binären Kode übersetzt, mit dem Maschinen bewegt werden können. Vielleicht gibt es eines Tages ein Kodebuch vom Denken und Fühlen: ein Verzeichnis der Hirnsignale von Gedanken, Erfahrungen und dergleichen. Man könnte dann die Gedankenwelt verschiedener Individuen vergleichen, vielleicht sogar über Artgrenzen hinweg.

Lauschangriff am Ort für Gedächtnisbildung

Der Hippocampus – besonders dessen CA1-Region – ist entscheidend daran beteiligt, neue ereignis- und ortsbezogene Inhalte ins Gedächtnis einzuspeisen. Die Struktur liegt im Schläfenlappen. Das Team des Autors forscht an Mäusen (abgebildet ist das menschliche Gehirn). Die Wissenschaftler entwickelten ein Verfahren, das ihnen erlaubt, das Verhalten von über 200 Nervenzellen der CA1-Region gleichzeitig einzeln zu erfassen. Bei den Messungen sind die Mäuse wach und können sich frei bewegen.



Diese CA1-Neuronen einer Maus wurden dazu gebracht, ein gelb fluoreszierendes Protein zu bilden. Auf der mikroskopischen Aufnahme ist gut zu sehen, wie stark diese Zellen sich verzweigen.

ILLUSTRATIONEN: ALICE Y. CHEN; NEURONEN-FOTO: M. FUHRMANN, JOCHEN HERMS, ZNP-MÜNCHEN

Dramatische Erlebnisse, die sich im Gedächtnis festfressen, wurden für diese Studien konzipiert

▶ Wie filtern Nervenzellpopulationen aus einer Erfahrung die bedeutendsten Einzelheiten heraus und bewahren sie?

Zunächst mussten wir Geräte entwickeln, um die Hirnaktivität besser registrieren zu können. Denn wir wollten ja weiterhin mit Mäusen arbeiten, schon um später zu sehen, was im Gehirn der klugen Genmäuse etwa im Vergleich zu gedächtnisschwachen Mäusen passiert. Bei Affen gelang es Forschern damals schon, an wachen Tieren die Aktivität einiger hundert Hirnneuronen gleichzeitig aufzuzeichnen. Doch Mäuse haben ein viel kleineres Gehirn, sodass bis dahin höchstens zwei oder drei Dutzend Zellen erfasst wurden. Mein damaliger Mitarbeiter Longnian Lin und ich entwickelten aber jetzt eine Apparatur, mit der wir das Verhalten von sehr viel mehr Hirnneuronen simultan registrieren konnten – und zwar an wachen Tieren, die sich frei bewegten.

Anschließend dachten wir uns für unsere Versuchstiere möglichst aufschlussreiche Gedächtnisexperimente aus. Besonders gut merkt sich das Gehirn dramatische Erlebnisse, die für das Leben einschneidende Folgen haben könnten. Den Terroranschlag in New York am 11. September 2001 vergisst ein Augenzeuge wohl nicht so leicht. Auch ein schweres Erdbeben gräbt sich unauslöschlich in die Erinnerung. Sogar der simulierte Fahrstuhlabsturz im »Tower of Terror« von Disneyland kann sich besonders einprägen. Ähnlich starke Schreckerlebnisse – Episoden, die Emotionen auslösen – wollten wir den Tieren bieten. Denn wir erwarteten, dass ihnen solche Vorfälle besonders lange und lebendig im Gedächtnis blieben. Vor allem hofften wir aber, dass sich dabei viele Hippocampuszellen zuschalteten. Das würde unsere Chancen erhöhen, genügend Neuronen zu finden, die währenddessen aktiv waren. Dann nämlich konnten wir unsere Aufzeichnungen nach Mustern durchsuchen, um vielleicht Organisationsformen des Gedächtnisses aufzudecken.

Schreck im Hippocampus

Folgende drei Schreckerlebnisse konzipierten wir: Als Erdbeben schüttelten wir einen kleinen Kasten, in dem die Maus saß. Wir simulierten eine herabstürzende Eule durch einen plötzlichen Luftstoß, den wir der Maus auf den Rücken bliesen. Und wir imitierten einen Fahrstuhlabsturz, indem wir das Tier in einer Dose ein kleines Stück fallen ließen.

Jede Versuchsmaus musste jeden der drei Versuche siebenmal über sich ergehen lassen. Nach jedem Durchgang ließen wir sie einige Stunden in Ruhe. Während des Schreckerlebnisses sowie in den Stunden danach zeichneten wir die Aktivität von 260 Hippocampuszellen aus der so genannten CA1-Region auf (siehe Kasten oben und S. 50/51). Man wusste von diesen Zellen bereits, dass sie bei der Gedächtnisbildung eine Schlüsselfunktion einnehmen.

Mein Mitarbeiter Remus Osan und ich versuchten nun, in den Daten Muster zu entdecken, die sich auf die Schreckvorfälle bezogen. Wir benutzten dazu Mustererkennungs-Algorithmen, insbesondere die Multiple Diskriminantenanalyse (MDA), eine Faktorenanalyse. Dieses Verfahren kann viele Dimensionen grafisch auf nur drei projizieren. An sich haben wir es bei 260 Neuronen, die entweder aktiv sind oder nicht, mit 520 Dimensionen zu tun. Die drei Achsen der neuen, reduzierten Darstellung sind nun keineswegs irgendein Maß für die neuronale Aktivität. Sie bilden aber einen mathematischen Unterraum ab, in dem sich erkennen lässt, ob verschiedenartige Ereignisse charakteristische Muster erzeugen.

In diesen dreidimensionalen Raum projizierten wir alle erfassten Nervenzellantworten jeweils eines Tiers – mit erfreulichem Erfolg. Wir erhielten dabei nämlich vier separate blasenförmige Punktwolken (siehe Kasten S. 50/51, 2). Eine bestimmte Punktwolke gehörte zum Gehirn in Ruhe, eine zweite zum »Erdbeben«. Eine dritte war mit dem Luftstoß verbunden, die vierte mit dem »abstürzenden Fahrstuhl«. Das bedeutete: Jede Sorte Schreck rief in den Neuronenverbänden der CA1-Region ein eigenes Aktivitätsmuster hervor. Unserer Ansicht nach repräsentieren diese verschiedenen Muster jeweils in zusammengefasster Form Information zu Wahrnehmungs- und Emotionsaspekten sowie den Umständen der verschiedenen Ereignissorten.

Uns interessierte nun, wie sich die Muster in den Stunden nach einem Schreckerlebnis veränderten. Dazu ließen wir die Aufzeichnungen zu jedem einzelnen Erlebnis langsam abspulen und machten diesmal für Halbsekundenintervalle eine MDA-Analyse. Tatsächlich geschah eine Menge. Wir konnten bildlich darstellen, wie die Aktivitätsmuster direkt während eines Versuchs umsprangen oder besser: herumjagten. Das heißt, wir konnten den Vorgang der Gedächtnisablage visualisieren. Zum Beispiel beim »Erdbeben«: Zuerst zeigte sich Aktivität in der Ruhewolke, die Aktivität wanderte dann aber zur Erdbebenwolke, dann kehrte sie zur Ruhewolke zurück, und zwar in einem charakteristischen dreieckähnlichen Kurvenverlauf. (Das wirkt im Film entfernt wie ein Wurm aus vielen Leuchtpunkten, der sich zunächst in der Ruhewolke schlängelt, sich dann rasch zur Erdbebenwolke fortwindet und anschließend auf einem anderen Weg zurückkehrt; siehe: www.sciam.com/ontheweb; July 2007.)

Noch interessanter war folgende Beobachtung: Ein ähnliches Muster wie bei dem jeweiligen Schreckereignis wiederholte sich danach oft einige Male spontan, also ohne neues Erlebnis, in unregelmäßigen Abständen von Sekunden bis Minuten. Der Kurvenverlauf ähnelte geometrisch dem ersten, aber seine Amplitude wurde kleiner.

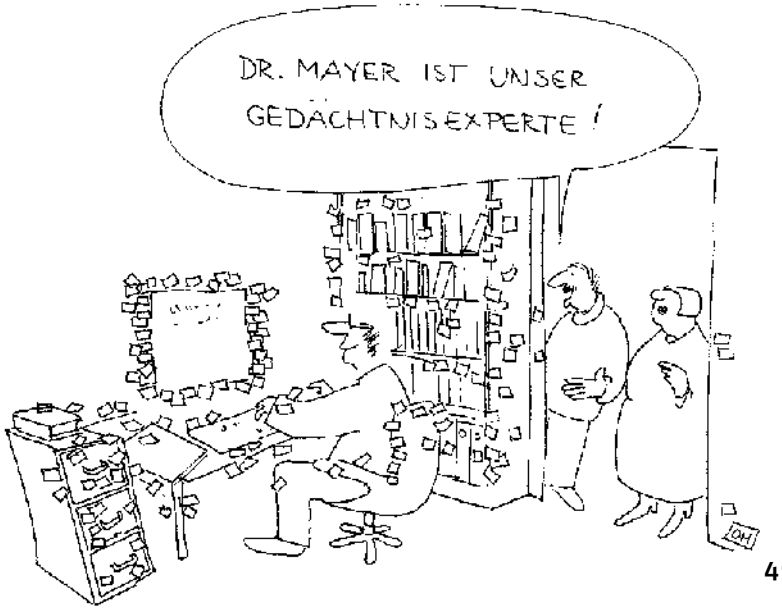
Vermutlich bedeutet dies, dass sich die Information ins Gedächtnis schreibt – dass der Aktivitätsverlauf vom Erlebnis, der durch den Hippocampus wandert, in den Gedächtnisschaltkreisen des Gehirns abgelegt wird. Wir meinen auch, dass diese Wiederkehr einem Erinnern entspricht. Daraus folgt: Qualitativ und quantitativ messen zu können, wie sich die Muster wiederholen, die einen Gedächtnisinhalt verschlüsseln, dürfte für die Zukunft Einblicke erlauben, wie frische Gedächtnisspuren zu dauerhaften Inhalten werden. Eines Tages wird man vielleicht auch zusehen können, ob bei schlauen oder bei lernbehinderten Mäusen etwas anders abläuft als bei normalen Tieren.

Kodierende Cliquen entlarvt

Muster vom Hippocampus, die auf spezifische Gedächtnisinhalte hinweisen, hatten wir nun. Doch wie erzeugen die Nervenzellen sie überhaupt? Wie arbeiten jene vielen Neuronen eigentlich zusammen, von denen wir bei unseren Experimenten eine kleine Auswahl beobachteten? Um das herauszubekommen, mussten wir die Aufzeichnungen noch weiter auseinandernehmen. Osan und ich koppelten die zeitaufgelösten MDA-Verfahren mit einer hierarchischen Clusteranalyse. Zu unserer Freude wurden wir auch diesmal fündig: Jeweils spezifische Untereinheiten von Zellpopulationen erzeugten die errechneten übergreifenden Muster. Wir nennen sie »neuronale Cliquen«. Eine solche Clique besteht aus allen Nervenzellen, die auf ein bestimmtes Ereignis ähnlich reagieren und dadurch im Kollektiv operieren, als feste Kodierungseinheit (siehe Kasten S. 50/51, 3).

Hierbei wird jedes spezifische Ereignis stets von einem Satz aus mehreren – immer denselben – neuronalen Cliquen repräsentiert, die

Der neuronale Aktivitätsverlauf zu einem Erlebnis wiederholt sich, als ob sich das Gehirn erinnert



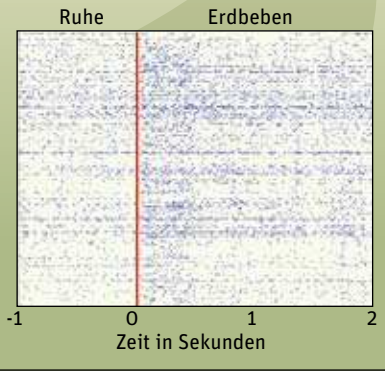
Dem Gedächtniskode näherkommen

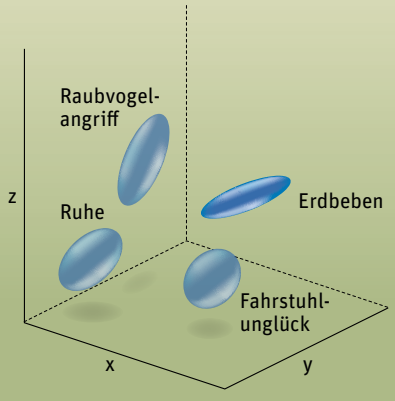
Um den Gedächtniskode zu entschlüsseln, analysierte das Team des Autors Hirnsignale mit neuen Methoden.

1 Aufzeichnen von Neuronenaktivität bei verschiedenen Erlebnissen
Die Mäuse erlebten drei Schreckensereignisse: ▶ »herabstürzender Raubvogel« (Luftstoß auf den Rücken) ▶ »abstürzender Fahrstuhl« (mit einem Kasten herunterfallen) ▶ »Erdbeben« (in einem geschüttelten Kasten sitzen) Zeitgleich wurde das Verhalten von 260 CA1-Zellen ihres Hippocampus aufgezeichnet. Jede Zeile im Bild unten steht für eine einzelne Zelle.

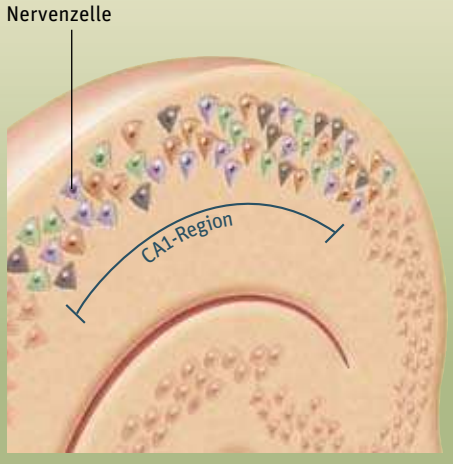
2 Gesamtmuster in den Neuronenaktivitäten
Mit Mustererkennungs-Algorithmen wurden die Daten jedes Tiers auf drei Dimensionen projiziert. Das ergab getrennte Punktewolken für die drei Schreckerlebnisse sowie eine für »Ruhe«. Mit solchen Projektionen lässt sich »lesen«, was die Maus gerade erlebt (eine kurze Filmsequenz dazu unter: www.sciam.com/ontheweb; July 2007).

3 Zellcliquen für Teilinformationen
Die Zellen, die bei einer bestimmten Erlebnisart ansprechen, konnten auf mehrere getrennte Gruppen aufgeteilt werden, neuronale Cliquen genannt (Farben in der Zeichnung). Zellen einer Clique reagieren weit gehend gleich – und jede Clique bildet eine eigene Einheit .





Schema von Zellcliquen, die bei »Erdbeben« ansprechen (jede Farbe entspricht einer Clique; siehe auch Bild rechts)



Hierarchisch aufgebaute Gedächtnispyramiden ergeben unzählige Kombinationsmöglichkeiten für alle Sorten von Erlebnissen

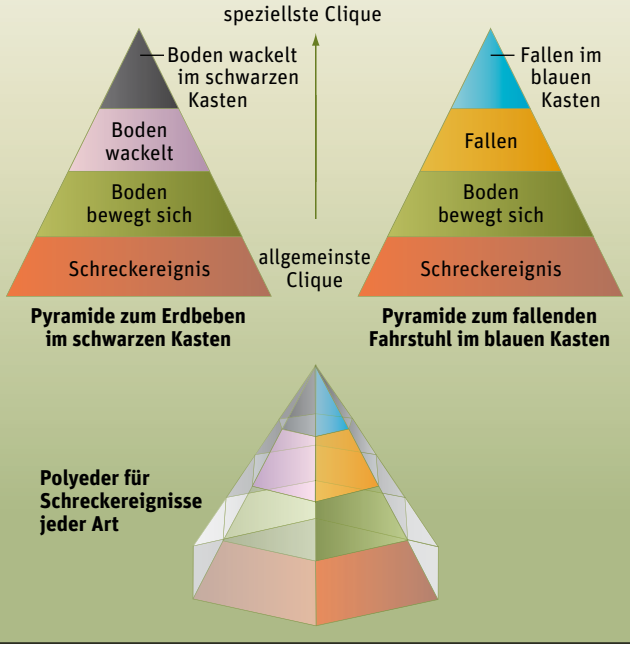
aber jeweils andere Aspekte des Erlebnisses kodieren. Manche Cliquen sind für übergeordnete, allgemeinere – gewissermaßen abstraktere – Bereiche zuständig, manche für spezifische. Ein »Erdbeben« etwa aktiviert gleich vier solche Cliquen: eine, die sich auch in den anderen alarmierenden Situationen meldet (also in all den Schrecksituationen); des Weiteren eine, die generell bei verstörenden Bewegungen des Untergrunds anspricht (bei Erdbeben und Fahrstuhlunglück); eine dritte Clique reagiert nur bei Geschütteltwerden (Erdbeben); eine vierte gibt wieder, wo das Ereignis stattfindet (zum Beispiel, in welcher der beiden Schachteln, die wir für die Erdbeben benutzten).

Die Cliquen arbeiten bei einem bestimmten Vorfall offensichtlich in gleich bleibenden, hierarchisch organisierten Einheiten, so genannten Ensembles. Stets repräsentiert also eine Kombination von ihnen die Information zu dem erschreckenden Vorfall in gleicher Weise. Anschaulich stellen wir uns vor, dass die Cliquen, die beim gleichen Erlebnis agieren, funktionell eine Art Pyramide bilden und so zusammen dessen Kennzeichen kodieren (Kasten oben, 4). Und zwar werden an der Pyramidenbasis die allgemeinen Attribute des Geschehnisses abgehandelt (etwa, dass man ordentlich erschrickt). Die Spitze ist für markante Besonderheiten zuständig (etwa »Beben des Bodens« oder sogar »Beben in der schwarzen Kiste«).

Wir überlegten nun: Die CA1-Region des Hippocampus erhält Eingänge aus vielen Hirngebieten und Sinnessystemen. Höchstwahrscheinlich hat das Einfluss darauf, welchen Informationstyp eine bestimmte Clique kodiert. So könnten die Neuronen, die gemeinsam bei allen drei Schreckversuchen reagieren, Information aus der Amygdala (dem Mandelkern) mit einbeziehen. Diese Struktur verarbeitet Gefühle, etwa Angst oder neue Erlebnisse. Somit würde die entsprechende Clique festhalten, dass man in der Situation furchtbar erschrickt und Angst hat. Und die Zellclique, die bei Erdbeben und Fahrstuhlunglück anspricht, wäre vielleicht mit dem Gleichge-

4 Hierarchisch angelegte Cliquen

Jede Clique verschlüsselt einen anderen – mehr oder weniger übergeordneten beziehungsweise speziellen – Aspekt des Erlebnisses. Das kann man sich als Pyramide vorstellen, wobei die Zellgruppen für spezifische Merkmale die Spitze bilden, jene für abstrakte die Basis. Verschiedene solche Pyramiden teilen die Basis, was ein Polyeder ergibt, in dem Fall ein »Polyeder des Schreckens« (unteres Bild). Die Veranschaulichung als Pyramide besagt nichts über die Neuronenzahl einer Clique.



5 Binärer Kode zur Hirnaktivität

Die Aktivität der einzelnen Cliquen lässt sich linear als binärer Kode darstellen. Er verschlüsselt, was das Tier erlebt (oder erlebt hat). Eine Eins bedeutet: Die Clique ist aktiv; eine Null: Sie reagiert nicht. Hierüber könnten Ärzte die Gedanken und Wünsche sprachloser Patienten lesen. Auch ließen sich Roboter besser als bisher rein mit Gedanken steuern.

ILLUSTRATIONEN: ALICE Y. CHEN (1 UND 3); LUCY READING-IKKANDA (2, 4 UND 5); MAUS: PRINCETON UNIVERSITY

wichtsorgan im Innenohr verbunden. Sie würde dann verschlüsseln, dass man bei diesem Geschehen das Gleichgewicht verliert.

Ähnlich könnten Cliquen, die nur reagieren, wenn ein Ereignis in einer bestimmten Box geschieht, Eingänge von »Ortsneuronen« haben – also von Zellen, die nur feuern, wenn das Tier sich an einem bestimmten vertrauten Ort befindet. Eine solche Clique besagt dann wohl: »Das war in dem schwarzen Kasten, als der Boden wackelte.«

Fürs Grobe oder fürs Feine

Was folgt aus diesen Befunden? Wir meinen, darin stecken Hinweise auf die Organisationsprinzipien, welche die Gedächtnisbildung lenken. So bilden die neuronalen Cliquen unseres Erachtens die funktionalen Kodierungseinheiten, die Gedächtnisinhalte erstellen. Als Gesamtheit wirkt eine Clique zudem stabil genug, um die Information selbst dann noch gut abzubilden, wenn einzelne ihrer Zellen in ihrer Aktivität vom Gesamtmuster etwas abweichen.

Nun ist die Vorstellung keineswegs neu, dass Gedächtnis- und Wahrnehmungsinhalte von ganzen Zellpopulationen repräsentiert werden und nicht von Einzelzellen. Wir denken aber, dass jetzt erstmals experimentelle Daten vorliegen, wie Nervenzellen dies tatsächlich organisieren, wie sie die Gedächtnisinformation aufgliedern. Um die verschiedenen Aspekte eines Geschehens zu erfassen und herauszufiltern, aktiviert das Gehirn anscheinend mehrere Cliquen gleichzeitig – also verschiedene Zellverbände –, die jeweils einzelne Inhalte davon kodieren. Wesentlich erscheint uns, dass der gesamte Inhalt wie in einer Pyramide in hierarchisch geordneten Ebenen oder Kategorien vorliegt – wobei die Ebenen nach unten hin immer abstraktere und allgemeinere, nach oben hin immer spezifischere Komponenten des Erlebnisses darstellen. Wir glauben außerdem, dass solche Pyramiden der Gedächtnisbildung mit anderen zusammen bildlich gesprochen ein Polyeder bilden. Es gäbe dann zum Beispiel ein gemeinsames Polyeder für alle

Was der Autor weiter erforschen möchte

- **Gedächtnisinhalte** erscheinen im Hippocampus nach Teilaspekten sortiert auf verschiedenen hierarchischen Ebenen, für die feste Zellpopulationen – neuronale Cliquen – zuständig sind. Untergliedern sich diese neuronalen Verbände noch in Teilpopulationen? Enthält zum Beispiel eine Clique, die generell für die Erlebnisqualität »Angst« zuständig ist, eine Unterfraktion, die auf die Angstintensität anspricht, und daneben vielleicht eine andere, die einfach nur registriert, dass ein Erlebnis Angst macht?
- **Die Spur im Hippocampus,** die bei einem Erlebnis auftritt, kann wiederkehren. Wie unterscheiden sich solche Muster kurz nach dem Erlebnis von wesentlich späteren Spuren des Ereignisses? Und wie entstehen falsche Erinnerungen?
- **Signalmuster** aus dem Gehirn lassen sich in binäre Kodes überführen. Wie könnte man damit Gedächtnisinhalte und Gedanken in Computer einfüttern? Wie lassen sich damit Roboter steuern? Wie ließe sich Lernen in Echtzeit erkennen?

Schreckerlebnisse mit gleichen Bausteinen an der Basis und verschiedenen an der Spitze (siehe Kasten S. 50/51, 4).

Nach diesem Prinzip vermag das Gehirn praktisch unbegrenzt Bausteine zu kombinieren und Pyramiden zur Gedächtnisenkodierung zu erstellen. Anders gesagt: Um die schier unbegrenzten Erlebnismöglichkeiten trotzdem im Einzelfall – als je eigenes Netzwerk-Muster – repräsentieren zu können, benutzt es hierarchisch unterschiedliche Kategorien und verwendet auf den unteren Stufen für viele Ereignisse dieselben Zellverbände. Ähnlich wie beim genetischen Kode mit seinen wenigen DNA-Bausteinen ergibt das unzählige Kombinationsmöglichkeiten für alle Eventualitäten. Dieses Prinzip hat den Vorteil, dass bei einem neuen Erlebnis nur die obersten Bausteine der Pyramide neu erzeugt werden müssen, dass sich dafür also neue Cliquen bilden. So muss nicht gleich der gesamte Gedächniskode neu hergestellt und verknüpft werden, nur weil diesmal nicht ein Schäferhund, sondern ein kläffender Pudel hinter der Hecke hervorstürzt.

Dass jede solche Pyramide, die einen Gedächtnisinhalt verschlüsselt, auch Neuronencliquen für ziemlich abstrakte Inhalte enthält, bestärkt die Vorstellung vieler Forscher, wonach das Gehirn eben nicht wie ein Automat funktioniert und von einem Erlebnis einfach sämtliche Details aufzeichnet. Ganz im Gegenteil kann es dank dieser Neuronenverbände einerseits die speziellen Schlüsselmerkmale von etwas Erlebtem speichern, andererseits aber auch allgemein gültige Attribute erfassen. Das ist bei neuen Erlebnissen hilfreich, die zwar in manchem ähnlich, in einigem aber doch verschieden sind. Der Kern unserer Intelligenz ist ja, dass wir aus ganz alltäglichen Erfahrungen abstrakte Konzepte gewinnen. So bewältigen wir die vielen neuen Situationen, mit denen wir ständig konfrontiert werden.

Manchmal empfinden Mäuse einen Futternapf als Nest. Tatsächlich gibt es in ihrem Hippocampus Zellen, die offenbar auf alles ansprechen, was irgendwie als Nest dienen kann.

Trickreich abstrahieren

Nehmen wir etwa das Konzept »Bett«. In jedem Hotel der Welt erkennen wir sofort unser Bett, sogar wenn wir das spezielle Möbelstück noch nie gesehen haben. Die Zellverbände für die Gedächtniseingabe sind derart angelegt, dass wir behalten können, wie ein bestimmtes Bett aussah, aber auch generell wissen, was ein Bett ist. Dergleichen können übrigens in gewisser Weise auch Mäuse. Wir entdeckten das zufällig. Einige wenige Zellen im Mäusehippocampus scheinen auf das abstrakte Konzept »Nest« anzusprechen. Bei jeder erdenklichen Art von Nest reagieren diese Zellen heftig. Ob das Ding rund oder eckig ist, ob es aus Holz, Wolle oder Plastik besteht, ist völlig egal – wenn es nur eine enge Mulde bildet. Liegt darüber aber eine Glasscheibe, sodass man nicht mehr hineinkrabbeln kann, hören jene Zellen auf zu feuern. Unseres Erachtens sprechen sie nicht auf die spezifischen physischen Merkmale des Objekts an – weder auf Aussehen noch Form oder Material –, sondern allein auf seine Funktionalität: Ein Nest ist etwas, worin man sich zum Schlafen zusammenrollen kann. Zur Not leistet das auch ein Futternapf (Bild links).

Höchstwahrscheinlich handelt es sich um einen allgemeinen Mechanismus des Gehirns, wenn es Inhalte mittels Neuronencliquen erfasst, die in hierarchischen Kategorien angeordnet sind. Dann würden auch andere Hirnregionen – nicht nur der Hippocampus – in dieser Weise funktionieren, wenn sie Information verarbeiten und abbilden. Von Sinneswahrnehmungen bis zum bewussten Denken: Das Prinzip könnte bei ganz verschiedenen Aufgaben angewendet werden.

Für diese These spricht einiges. Zum Beispiel entdeckten Wissenschaftler im Sehsystem Nervenzellen, die generell auf alles ansprechen, was wie ein Gesicht aussieht, gleichgültig ob es sich um ein Menschen- oder Affengesicht handelt oder etwa ein Blatt in Gesichtsform. Andere Forscher entdeckten sogar Neuronen, die sich nur bei einer Unterklasse von Gesichtern melden. Als sie bei Epileptikern Hirnfunktionen prüften, stießen Neurologen auch im Hippocampus auf eine kleine Fraktion von Nervenzellen, die verstärkt feuerten, wenn man dem Patienten Fotos berühmter Leute zeigte. Itzhak Fried von der Universität von Kalifornien in Los Angeles entdeckte bei einem Patienten sogar eine Zelle, die offenbar nur auf die

GEDÄCHTNISMOLEKÜLE

Der kanadische Psychologe Donald O. Hebb postulierte schon 1949, dass bei der Gedächtnisbildung der Signalfluss an Kontaktstellen (Synapsen) zwischen zwei Nervenzellen infolge ihrer Interaktion bleibend stärker wird. Erst in den 1980er Jahren konnten Wissenschaftler das an Hirnschnitten bestätigen. Holger Wigström von der Universität Göteborg und seine Kollegen stimulierten Neuronenpaare, jeweils die Sender- und die Empfängerzelle gleichzeitig. Wirklich wurde die Synapsenübertragung stärker: Die zweite Zelle reagierte nun intensiver als vorher auf das gleiche Signal. Die Forscher glaubten, dafür müsse der NMDA-Rezeptor auf Seiten der Empfängerzelle verantwortlich sein.

Diese These prüften der Autor und sein Team an erwachsenen Genmäusen, in deren Hippocampus ein bestimmter Typ dieses Rezeptors fehlt. Tatsächlich litten diese Tiere an erheblicher Gedächtnisschwäche. Auch ein umgekehrter Eingriff gelang: Sie erzeugten die schlaue Maus Doogie. Dieser Stamm produziert im Hippocampus und in der Hirnrinde besonders viel von einer Untereinheit des NMDA-Rezeptors (NR2B). Die Tiere lernen ungewöhnlich schnell und dauerhaft.

Die Forscher vermuten, dass die Aktivierung dieses Rezeptors – wohl auch die Wiederholung des Vorgangs – dabei hilft, die Erregungsmuster von neuronalen Gedächtniscliquen im Gehirn abzulegen. So würde die molekulare mit der Netzwerkebene verknüpft.

Schauspielerin Halle Berry ansprach. (Existiert im Gehirn dieses Mannes wohl eine Halle-Berry-Clique?) Es könnte im gesamten Gehirn das generelle Organisationsprinzip herrschen, Einheiten zu verwenden, die Inhalte beim Verarbeiten hierarchisch sortieren.

Unsere Mäuseversuche brachten uns noch auf eine völlig andere Idee. Mit solchen Daten sollte man eigentlich vergleichen können, welche Aktivitätsmuster verschiedene Tiere in ihrem Hippocampus erzeugen. Dann sollte es sogar möglich sein, Information vom Gehirn auf einen Computer zu übertragen. Wir überführten also die Aktivitäten von neuronalen Cliquenverbänden in binäre Kodes. In der Zahlenfolge aus Nullen und Einsen bedeutete jede Eins die Aktivität einer bestimmten vorgegebenen Clique des Hippocampus, jede Null deren Schweigen. Die Reihenfolge der Positionen bestimmten wir vorher. »11001« etwa bedeutete folgende Kombination: »Schreck«; »Boden bewegt sich«; »kein Luftstoß im Nacken«; »kein Fall ins Bodenlose«; »herumgeschüttelt werden«. Somit handelte es sich um die Erfahrung »Erdbeben« (siehe Kasten S. 50/51, 5).

In dieser Weise haben wir von vier Mäusen Aktivitäten von Cliquenverbänden in binäre Kodes übersetzt. Tatsächlich vermochten wir an den Kodes dann mit einer Genauigkeit von bis zu 99 Prozent zu erkennen, welchen Schreckversuch jedes Tier durchlebt hatte – und auch, in welchem Behältnis es dabei saß. Mit Hilfe der Mathematik konnten wir in den Gehirnen der Mäuse lesen und das jeweils Gelesene miteinander vergleichen.

Der Trick mit dem binären Kode dürfte sich, so hoffen wir, weiter ausbauen lassen. Vielleicht können Forscher auf diese Weise einmal einen Rahmen schaffen, um kognitive Prozesse zu analysieren, also das Denken zu verstehen. Das könnte sogar über Artgrenzen hinweg gelingen. Vor allem aber würde uns dieser Ansatz einer möglichst direkten Kommunikation in Echtzeit zwischen Gehirn und Computer näherbringen. Dazu haben wir selbst folgendes System konstruiert: Eine Maus erlebt ein »Erdbeben«; eine Apparatur übersetzt das Erlebnis, also die Hippocampusaktivität, in einen binären Kode; der Kode wiederum veranlasst, dass sich in der geschüttelten Box eine Tür öffnet, durch die die Maus entschlüpfen kann.

Es gibt schon verschiedene Methoden, bei denen gelähmte Menschen den Cursor auf einem Computerbildschirm mit Erregungsmustern steuern, die von ihrem Gehirn abgegriffen werden. Affen können bereits einen Roboterarm mit Signalen bewegen, die man von ihrer motorischen Hirnrinde ableitet. Die Methode mit dem binären Kode erscheint uns eine naheliegende Alternative zu bisherigen Vorgehensweisen, um Hirnsignale auf Geräte zu übertragen. Vorstellbar wäre hierbei sogar, dass es eines Tages gelingt, Gedächtnisinhalte direkt in Computern zu speichern (siehe Spektrum der Wissenschaft 5/2007, S. 84).

Gedanken lesen

Bisherige Methoden, Hirnaktivitäten zu erfassen, sind nicht fein genug, um wirklich die Gedanken eines Menschen zu lesen – etwa von Wachkomapatienten oder Alzheimerkranken, die nicht mehr sprechen können. Ein EEG oder eine Magnetresonanztomografie liefern nur jeweils das Durchschnittsverhalten von Millionen Zellen zugleich. Die Daten sind so verschwommen, als würde man einem Fussballspiel von außerhalb des Stadions zuhören. Was einzelne Nervenzellen machen, erfährt man nicht.

Eine Lösung wäre, die Aktivitäten von genügend einzelnen Hirnzellen gleichzeitig abzugreifen. Gäbe es ein entsprechend empfindliches nichtinvasives Verfahren, ließen sich zum Beispiel auch Geisteskrankheiten diagnostizieren, und man könnte die Wirkung von Medikamenten verfolgen. Auch bessere Lügendetektoren sind vorstellbar.

Solche Überlegungen werfen natürlich schwer wiegende ethische, philosophische und gesellschaftliche Fragen auf. Damit muss man sich auseinandersetzen. Sicherlich würde jeder gern wissen, was andere denken, mag sich aber selbst nicht ins Gehirn schauen lassen.

Gedankenlesen mit Zahlenkodes

Zudem sitzen Computeringenieure, auch wir, schon an Entwürfen für eine völlig neue Generation intelligenter Computer und netzwerkbasierter Systeme. Diese Systeme sollen nach den Prinzipien des Gedächtnisses verschaltet sein und dann leisten, worin Maschinen heute noch kläglich versagen: Entscheidungen kognitiver Art zu treffen, wie sie Menschen leicht fallen. Wir begegnen zum Beispiel nach zwanzig Jahren einem Schulkameraden und erkennen ihn gleich wieder, selbst wenn er jetzt einen Bart trägt. Vielleicht gibt es irgendwann intelligente Maschinen, die mit ausgeklügelten Sensoren und einer Logikstruktur ähnlich dem Gedächtniskode ausgestattet sind. Unter Umständen würden sie sogar mehr können, als nur unsere kognitiven Fähigkeiten nachzuahmen. Dann würden sie uns bei komplexen Denkanforderungen wohl ausstechen.

In unseren Entdeckungen sehe ich viele interessante – und durchaus auch heikle – philosophische Aspekte. Sollte es eines Tages tatsächlich möglich sein, die Erinnerungen und Gefühle eines Menschen, sein gesamtes Wissen, seine Vorstellungen und Fantasien in Zahlenfolgen von Einsen und Nullen zu übersetzten – wer kann sich heute ausmalen, was das für unser Sein und unsere Lebensführung bedeuten würde? Füttern wir in 5000 Jahren wohl unsere Gedanken und Erinnerungen in Computer, die dann vielleicht zu fernen Welten reisen? Werden wir in dem Netzwerk ewig leben? ◁

Joe Z. Tsien ist seit 2004 an der Boston-Universität (Massachusetts) Professor für Pharmakologie und Biomedizinische Technik sowie Direktor des Zentrums für System-Neurobiologie. Er fand bedeutende Zusammenhänge über Lernen und Gedächtnis und gilt als ein Vorreiter für Methoden, gezielt Gene oder Proteine auszuschalten. Schlagzeilen machte er 1999 mit der klugen Genmaus Doogie. Kürzlich gründete er an der Normaluniversität Ostchina das Schanghai-Institut für Funktions-Genomik des Gehirns.

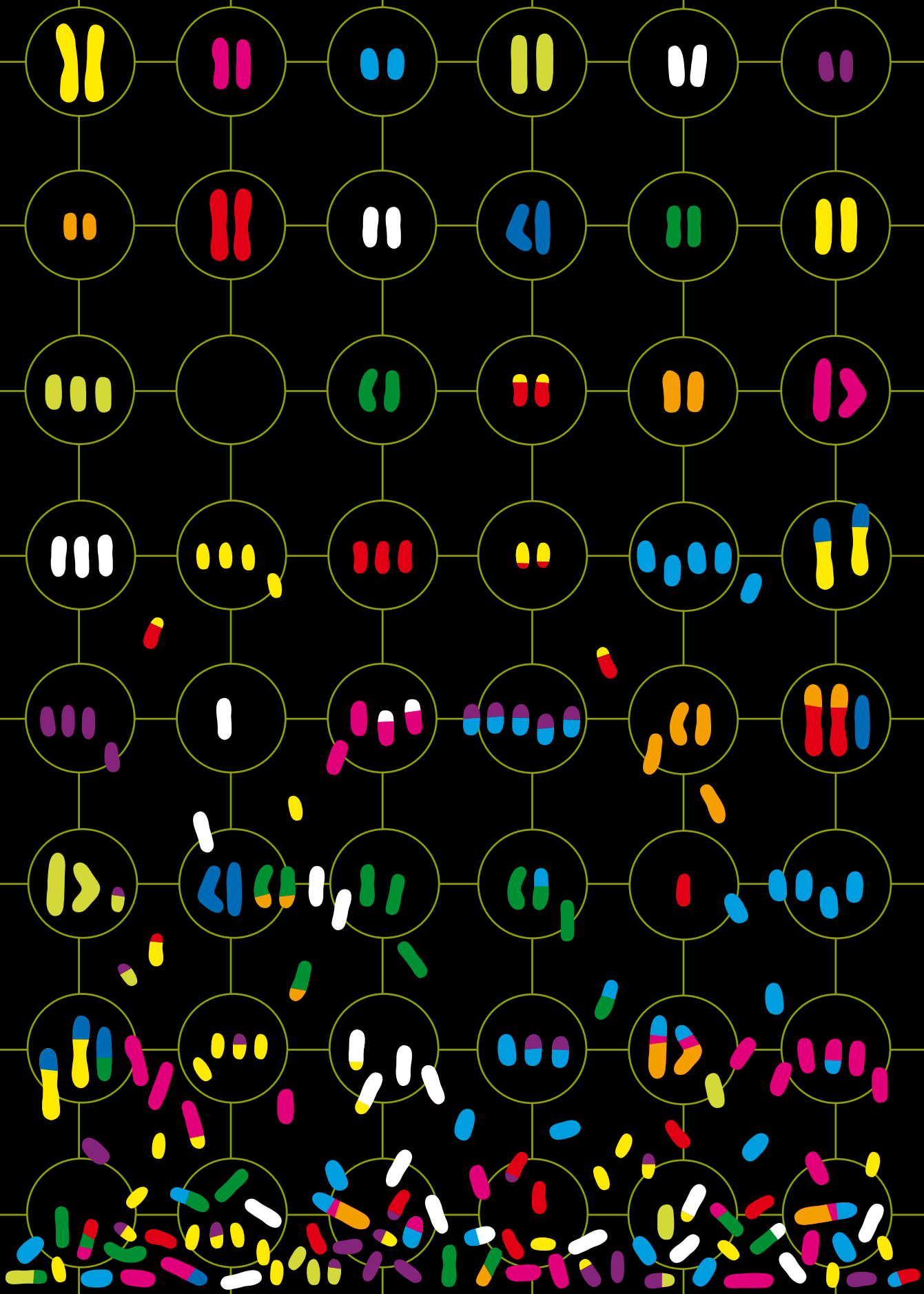
Neural encoding of the concept of nest in the mouse brain. Von L. Lin et al. in: Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Bd. 104, Heft 14, S. 6066, 3. April 2007

Organizing principles of real-time memory encoding: Neural clique assemblies and universal neural codes. Von L. Lin et al. in: Trends in Neurosciences, Bd. 29, Heft 1, S. 48, Januar 2006

Weblinks zu diesem Thema:
www.spektrum.de/artikel/903041

Weitere relevante Informationen aus dem Spektrum-Verlag:
www.spektrum.com/gehirn
www.spektrum.com/lernen

KREBSENTSTEHUNG



JEN CHRISTIANSEN

DAS CHAOS IN DEN CHROMOSOMEN

Das gängige Gen-Modell zur Entstehung bösartiger Tumoren kann wichtige Eigenschaften von Krebs nicht erklären. Aber mit einer neuen Perspektive, die auf Chromosomen statt auf Gene gerichtet ist, gelingt das vielleicht.

Von Peter Duesberg

In den frühen 1960er Jahren, als ich nach meiner Doktorarbeit in Frankfurt mit der Erforschung von Krebs begann, standen Viren als potenzielle Verursacher hoch im Kurs. Führende Wissenschaftler hielten es für durchaus denkbar, dass die meisten, wenn nicht alle Formen von Krebs darauf zurückzuführen sind. Die Hypothese fußte auf der Entdeckung mehrerer tierischer Tumor- oder Leukämie-Viren, die ihre Gene in die Chromosomen der befallenen Zellen integrieren. Sie leiten eine Verwandlung in Tumorzellen ein, die sich unkontrolliert zu vermehren beginnen. Optimistisch und unerfahren, wie ich damals war, glaubte ich, wenn erst die zu Grunde liegenden molekularen Mechanismen genau genug erforscht wären, ließen sich Impfstoffe entwickeln, um eine der meistgefürchteten Krankheiten der Menschheit auszurotten.

Auf dem Weg zu Krebs entsteht aus einem – hier fiktiven – Satz zunächst paarweise vorhandener Chromosomen ein Chaos, in dem nun aber gewisse Muster gefunden wurden. Der Sachverhalt ist künstlerisch stark idealisiert dargestellt.

Im Jahr 1970 gelang es meinen Kollegen Michael Lai und Peter Vogt gemeinsam mit mir, ein krebsverdächtiges Gen aus dem Rous-Sarkom-Virus zu isolieren. Da der Erreger bei Geflügel bösartige Bindegewebswucherungen, so genannte Sarkome (englisch: *sarcomas)*, hervorruft, erhielt das Gen die Bezeichnung *src*. Binnen weniger Jahre erkannten dann kreativere Köpfe als ich, dass bereits die normale Erbsubstanz von Tieren und Menschen ein eng verwandtes zelleigenes Gen enthält. Damit war ein neues Modell der Krebsentstehung geboren. Seine Grundidee: Ein zelleigenes Gen, wie die menschliche Version von *src*, könnte durch irgendeine Veränderung – etwa eine Mutation – ähnlich gefährliche Kräfte in Gang setzen wie sein virales Gegenstück. Für eine solche tickende Zeitbombe in unserem Erbgut wurde der Begriff Proto-Onkogen geprägt. Durch Mutation würde es zum Onkogen und damit zum Auslöser von Krebs.

Diese Theorie, dass sämtliche Krebsarten des Menschen letztlich auf Mutationen in ge-

SERIE PHÄNOMEN KREBS:
Teil I: Krebsevolution
Teil II: Chromosomenchaos
Teil III: Krebsgenom-Atlas

Die Serie stellt Ihnen drei übergreifende Richtungen der Krebsforschung vor. Im letzten Heft erfuhren Sie, wie Evolutionsforscher Krebs erklären. Diesmal geht es um ein neues denkbares Modell der Krebsentstehung. Im November wird das ehrgeizige Riesenprojekt »Krebsgenom-Atlas« beschrieben.

In Kürze

- **Der gängigen Krebstheorie** zufolge entziehen sich Zellen normalen Kontrollmechanismen, wenn wichtige regulatorische Gene mutieren. Die groben Veränderungen in der Anzahl und Struktur der Chromosomen, die in sämtlichen Krebszellen zu beobachten sind, gelten nicht als primäre Ursache der Entartung.
- **Der Autor und seine Kollegen argumentieren hingegen**, dass Karzinogene zufällige unspezifische Veränderungen der normalen Chromosomenzusammensetzung verursachen und dadurch Tausende von Genen und ihre Proteine auf einmal aus dem Gleichgewicht bringen; das löse in einer Kettenreaktion immer neue Störungen des Chromosomenbilds aus, die zu den schließlich beobachteten Abweichungen bei Krebs führen. Erst durch diesen Mechanismus ließen sich jene Eigenschaften bösartiger Zellen erklären, mit denen die gängige Theorie Probleme hat.

wissen Schlüsselgenen zurückgehen, dominiert seit nunmehr 30 Jahren die Forschung. Dennoch vermochte bisher niemand – meine Person eingeschlossen – nachzuweisen, dass Krebsgene eine normale in eine bösartige, das maligne Stadium verkörpernde Zelle verwandeln können. Das Modell vernachlässigt zudem, was bei unvoreingenommenem Blick als wirklich gewaltige Störung erscheinen muss: Zwar mögen bei jeder bekannten Krebsart durchaus gewisse Gene mutiert sein – aber gleichzeitig sind die Chromosomen, die jeweils tausende Erbfaktoren tragen, gravierend verändert. Manche Chromosomen sind beispielsweise zerbrochen oder tragen Stücke von anderen, wieder andere Exemplare sind überzählig oder fehlen ganz. Nach dem gängigen Modell ist dieses chromosomale Chaos lediglich eine Folgeerscheinung von Krebs. Doch mehr und mehr deutet darauf hin, dass das Durcheinander die direkte Ursache allen Übels und die treibende Kraft sein könnte.

Ich selbst verfolge diese Möglichkeit zusammen mit einer Reihe von Kollegen in den USA und Deutschland nun schon seit über einem Jahrzehnt. Neuere Arbeiten vieler anderer Forscher legen ebenfalls den Schluss nahe, dass Abweichungen in der Anzahl und Struktur ganzer Chromosomen – statt Veränderungen bestimmter Gene – ausreichen, den zu Krebs führenden Prozess auszulösen und aufrechtzuerhalten. Diese Sichtweise hat wichtige Konsequenzen für die Vorsorge und Behandlung von Krebs sowie für die feingewebliche Diagnose seiner Vorstadien, bei denen die besten Chanchen auf Heilung bestehen. Überdies lassen sich damit manche Eigenschaften von Krebszellen wie auch ganzer Tumoren erklären, bei denen das Genmutationsmodell passen muss.

Notorisch instabil

Zur chromosomalen Theorie von Krebs gelangte unsere Arbeitsgruppe teilweise durch Überlegungen zu der Frage, welche grundlegenden biologischen Merkmale eigentlich eine normale menschliche Zelle als »normal« oder gar als «menschlich« kennzeichnen.

Was einzelne Gene anbelangt, so können diese innerhalb einer Spezies, auch bei der menschlichen, in etlichen mutationsbedingten Varianten auftreten. Variieren beispielsweise einzelne Bausteine (Nukleotide) der Erbsubstanz DNA mit einer gewissen Häufigkeit, so sprechen Fachleute von SNPs (nach dem englischen Kürzel für Einzelnukleotid-Polymorphismen). Jeder Mensch trägt über sein ganzes Genom verstreut solche gewöhnlich harmlosen Mutationen und vererbt sie an seine Kinder.

Mit den Chromosomen einer Art hingegen, sozusagen den Bänden der genetischen Enzyklopädie, geht die Natur gewöhnlich extrem konservativ um, was deren Anzahl und Struktur anbelangt: Der jeweilige Chromosomensatz, der so genannte Karyotyp, ist artspezifisch. Die sexuelle Fortpflanzung erzwingt seinen artgemäßen Erhalt, da eine geregelte Embryonalentwicklung absolute Konformität der Chromosomen erfordert. Embryonen, die veränderte Chromosomen enthalten oder eine falsche Anzahl, sind praktisch nicht lebensfähig. Eine der seltenen Ausnahmen, das Down-Syndrom, illustriert, was geschieht, wenn ein Mensch nur eine einzige zusätzliche Kopie des relativ kleinen Chromosoms mit der Nummer 21 besitzt. Auch wenn eine Zelle im reifen Organismus eine chromosomale Anomalie erwirbt, überlebt sie oft nicht.

Krebszellen und selbst ihre weniger auffälligen Vorläufer verletzen aber notorisch die karyotypische Stabilitätsregel. Normale menschliche Zellen sind »diploid«: Sie besitzen je zwei Exemplare der für uns spezifischen Chromosomen (nur das männliche Geschlechtschromosom hat keinen gleichartigen Partner). Die Zellen einer Geschwulst sind jedoch *immer* »aneuploid«. Das bedeutet, sie haben ganze Chromosomen oder Abschnitte davon verloren oder enthalten zusätzliche (siehe Abbildung auf der rechten Seite). Durch Aneuploidie kann der DNA-Gehalt einer Krebszelle auf über das Doppelte einer normalen diploiden Zelle ansteigen – oder sich nahezu halbieren.

Da die überzähligen oder fehlenden Teile insgesamt Tausende von Genen betreffen, produziert eine solche Zelle ein völlig unausgewogenes Mengenverhältnis an entsprechenden Proteinen. Ein grobes Ungleichgewicht wird unvermeidlich Zellstrukturen destabilisieren, Regelkreise aus dem Gleichgewicht bringen und die Funktion wichtiger im Team arbeitender Enzyme stören, darunter der Reparaturtrupps für geschädigte DNA. Wegen seiner hochkomplexen Maschinerie ist ausgerechnet der so genannte Spindelapparat das bei Weitem störanfälligste Team von Proteinen: Er muss bei der Zellteilung die Chromosomen gleichmäßig auf die Tochterzellen verteilen. Sobald eine erste zufällige Aneuploidie aufgetreten ist und die Zelle dies überhaupt überlebt, steigt daher die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Chromosomenbild dann ohne äußeres Zutun weiter verschlechtert (siehe Kasten S. 58/59).

Damit ließe sich erklären, warum selbst Krebszellen aus ein und demselben Tumor sich in der Zusammensetzung und in den Veränderungen ihrer Chromosomen unterscheiden können. Jede Zelle mit individuellem Karyotyp wird so in gewisser Weise zu

einer Spezies für sich. Die inhärente Instabilität der aneuploiden Tumorzelle ist der Grund dafür, dass Krebs so leicht neue individuelle Merkmale und Verhaltensweisen auszubilden vermag (fachlich spricht man von neuen Phänotypen). Somit unterscheiden sich die Krebszellen grundlegend von den normalen Gegenstücken im Organismus, die den artspezifischen Entwicklungsprogrammen folgend nur vorbestimmte organ- oder gewebespezifische Eigenschaften ausbilden.

Eine Menagerie voller Bestien mit einer Krokodilfalle bekämpfen

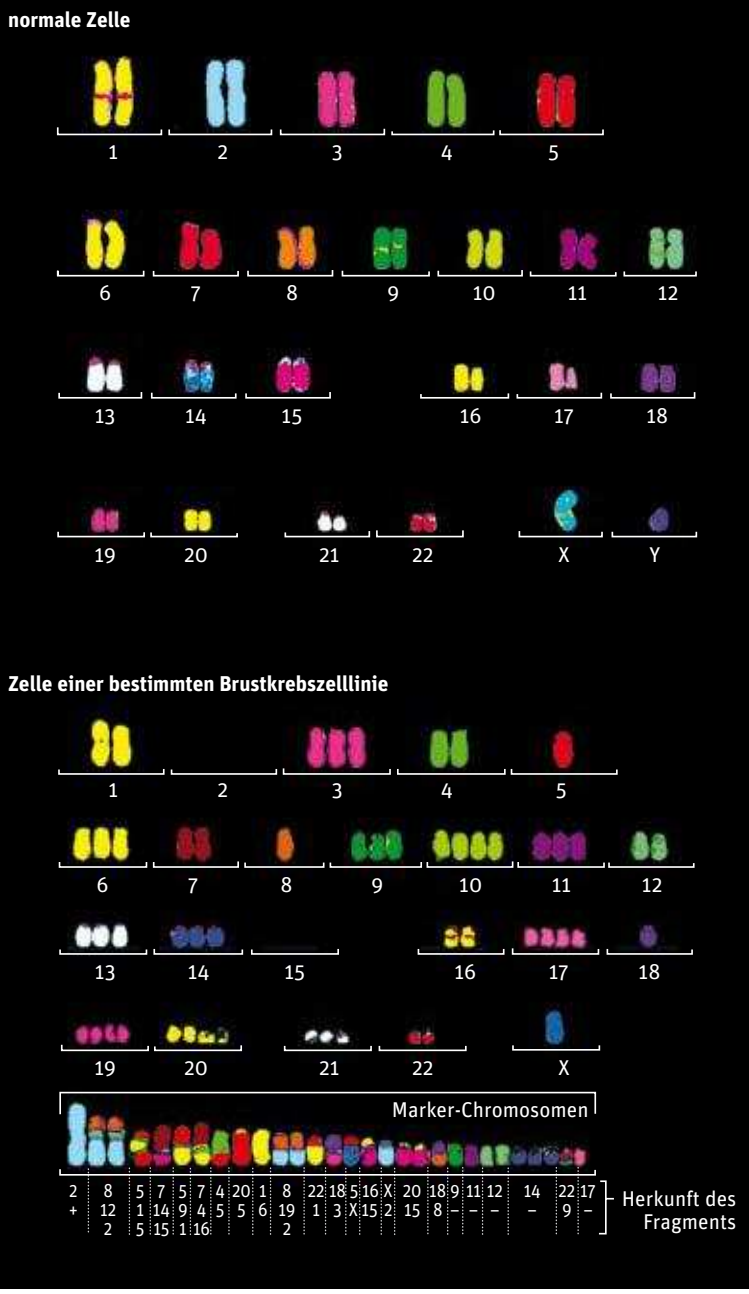
Wegen ihrer Veränderlichkeit können sich die Abkömmlinge einer aneuploid gewordenen Zelle nach und nach ihrer vorgesehenen Aufgaben im Verbund des vielzelligen Organismus entziehen. Sie wachsen zunehmend auf Kosten anderer, halten sich dabei immer weniger an Grenzen. Insgesamt werden Tumorzellen deshalb im Lauf der Zeit immer bösartiger. In diesem Prozess, der als Krebsprogression bezeichnet wird, entwickeln sie spontan ihre eigenen abnormen Größen, Formen, Stoffwechselmuster und Vermehrungsraten. Das am meisten gefürchtete Kriterium von Krebs ist aber, dass die Zellen die unnatürliche Fähigkeit erwerben, abzuwandern und in benachbarten Geweben oder gar in entfernten Organen Tochtergeschwülste zu bilden, so genannte Metastasen.

Die außergewöhnliche Variabilität von Krebszellen und die enorme Vielfalt ihrer Phänotypen sind die Gründe dafür, dass Krebs sowohl wissenschaftlich als auch therapeutisch nach wie vor ein ungelöstes Problem darstellt. Sobald beispielsweise ein Wirkstoff gegen Tumorzellen in einer Kultur oder im Körper eingesetzt wird, wuchern alsbald Varianten, die dagegen resistent sind. Hier mit nur einem Medikament anzugreifen, gleicht dem Versuch, mit einer Krokodilfalle gegen einen ganzen Zoo wilder Tiere vorzugehen.

Wie Forscher schon lange wissen, ist die gesamte Menagerie bösartiger Zellen eines Patienten aus einer einzigen Mutterzelle hervorgegangen. Da die Zellen eines typischen Tumors keineswegs identisch sind, ist auf eine bereits instabile Mutterzelle zu schließen. Dieser so genannte klonale Ursprung eines Tumors zeigt sich daran, dass bei allen oder den meisten seiner Zellen Chromosomen auf so einzigartige Weise strukturell verändert sind, dass das unmöglich bei mehreren Zellen unabhängig voneinander geschehen sein kann. Solche Chromosomen heißen Marker-Chromosomen. Es gilt somit, eine Theorie zu finden, die erklärt, wie eine einzige normale Zelle chromosomal und phänotypisch so instabil

Hier Ordnung, dort Anarchie

Der Chromosomensatz, der Karyotyp, einer normalen menschlichen Zelle (oben) besteht aus 23 Chromosomenpaaren (beim Mann sind die Geschlechtschromosomen ein ungleiches Paar, X und Y, bei der Frau dagegen ein gleiches Paar, X und X). Eine Tumorzelle, gleich welcher Art von Krebs, zeigt dagegen immer ein irreguläres Bild, einen so genannten aneuploiden Karyotyp (unten): Einige Chromosomen fehlen, andere liegen in Überzahl vor, und viele haben Bruchstücke ausgetauscht. Manche davon weisen markante Umbauten in ihrer Struktur auf, die in allen oder den meisten Zellen des jeweiligen Tumors vorkommen: Diese Marker-Chromosomen zeigen damit Veränderungen an, die sich auf die erste entartete Zelle zurückführen lassen, aus der der Tumor hervorgegangen ist. Die Zahlen unter den Marker-Chromosomen geben die Herkunft der Fragmente an. Die Plus- und Minuszeichen bedeuten, dass ein Chromosom größer oder kleiner ist als sonst.



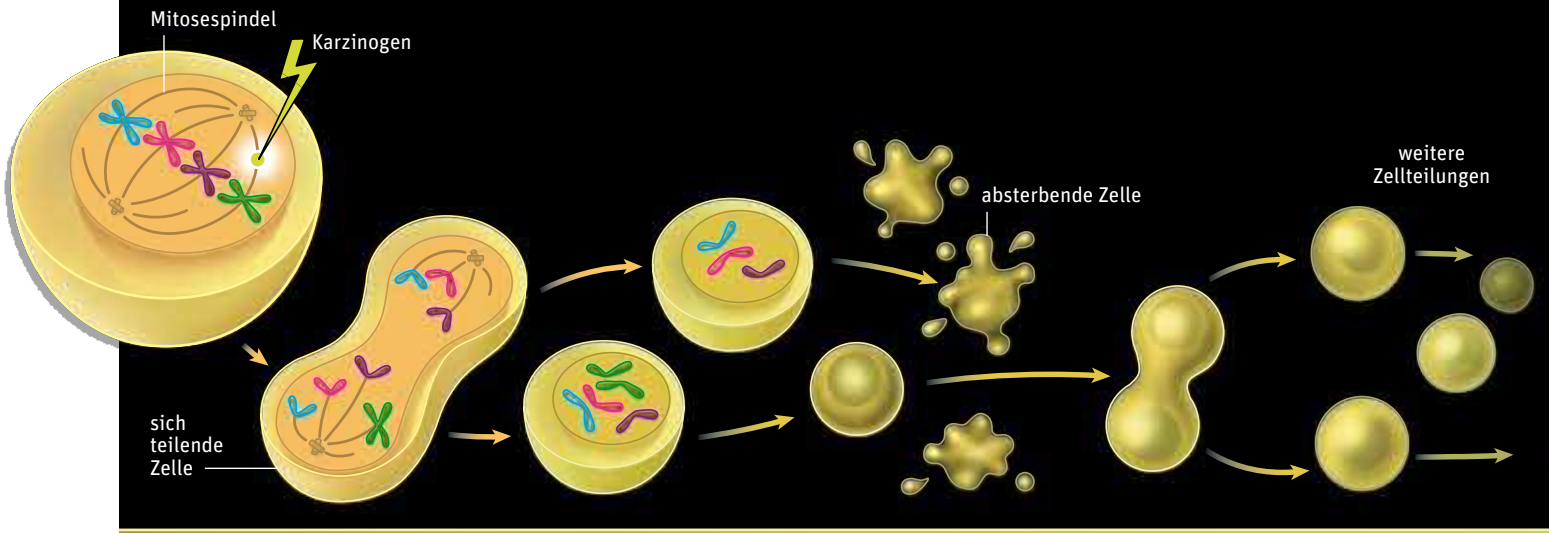
MIT FRDL. GEN. VON IOS PRESS, AUS: PETER DUESBERG ET AL., THE CHROMOSOMAL BASIS OF CANCER. CELLULAR ONCOLOGY 2005, BD. 27

Wie Aneuploidie zu Krebs führen könnte

Ein Karzinogen oder ein zufälliger Fehler bei der Zellvermehrung verursacht eine unspezifische Aneuploidie – den Gewinn oder Verlust irgendeines Chromosoms. Eine abnorme Zahl von Chromosomen schafft Bedingungen in einer Zelle, durch die weitere Schä-

1 Durch einen zufälligen Fehler oder durch Einwirkung von Karzinogenen auf die Chromosomen oder den Spindelapparat werden die Chromosomen bei einer Zellteilung ungleich verteilt; die beiden Tochterzellen sind dann aneuploid (hier sind der Übersichtlichkeit halber nur vier Chromosomen dargestellt).

2 Die meisten derart entstandenen Zellen sind nicht lebensfähig und sterben ab – eine überlebende Zelle kann sich aber unter Umständen weiter teilen. Die noch geringe Aneuploidie ihrer Nachkommen beeinträchtigt zwar erste Funktionen in den Zellen, aber es kommt noch zu keiner übermäßigen Vermehrung.



werden kann, dass sie sich zu einer tödlichen Krebszelle entwickelt, während Billionen andere Zellen im selben Organismus normal bleiben.

Noch bis vor rund fünfzig Jahren hielten die meisten Krebsforscher Chromosomen-Anomalien für die Ursache des Übels. Entwickelt wurde diese Theorie von den beiden deutschen Wissenschaftlern David von Hansemann und Theodor Boveri im späten 19. und im frühen 20. Jahrhundert. Von Hansemann, ein Pathologe, entdeckte bei seinen Studien in Berlin, dass bei allen Krebsarten abnorme Chromosomen vorkommen. Boveri, ein in Würzburg arbeitender Biologe, war durch eingehende Untersuchungen an Seeigel-Embryonen zu dem Schluss gelangt, dass die Chromosomen Träger der Erbinformation einer Zelle sind. Die Embryonen degenerierten nämlich, wenn während ihrer Zellteilung mit den Chromosomen etwas schiefging, etwa wenn eines zerbrach oder ganze Chromosomen ungleich auf die beiden Tochterzellen verteilt wurden. Manche der resultierenden missgebildeten Embryonen glichen Tumoren. Daraus schloss Boveri 1914, dass Krebs entsteht, wenn eine Zelle bestimmte Chromosomenveränderungen erleidet (siehe Kasten auf S. 60).

Manche der missgebildeten Embryonen mit gestörtem Chromosomensatz glichen Tumoren

Gene oder Chromosomen?

Ein halbes Jahrhundert später wandten sich viele Forscher dann jedoch von dieser Erklärung ab, weil mit den damals verfügbaren Methoden keine konsistenten chromosomalen Veränderungen in den chaotischen und heterogenen Karyotypen individueller Tumoren entdeckt werden konnten, vor allem nicht bei den besonders bösartigen. Stattdessen werteten sie die verwirrenden Krebs-Karyotypen als bloße Folgen der Entartung, die ihrerseits dann eine andere, mikroskopisch unsichtbare Ursache, etwa eine Mutation, haben musste.

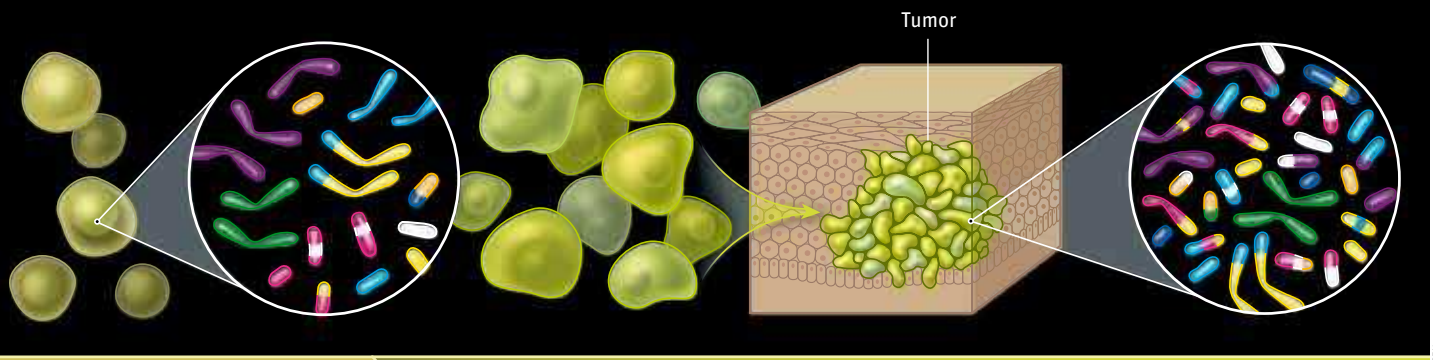
Dabei stützten einige, allerdings weit gehend vernachlässigte Indizien weiterhin die Annahme, dass Aneuploidie bei der Entstehung und dem Fortschreiten von Krebs eine wichtige Rolle spielt. Denn gerade den Grad

den sowie noch mehr Unordnung entstehen. Mit jeder neuen Zellgeneration nimmt die Instabilität zu und die Zellen entwickeln immer bösartigere Merkmale. Die unspezifischen chromosomalen Veränderungen am Anfang wirken also wie ein Katalysator.

3 Wegen der abnormen Chromosomen-Ausstattung verschiebt sich die Dosis zahlloser Proteine in den Zellen. Dies führt zu Instabilität. Regulierungsprozesse in der Zelle sowie die DNA-Reparatur und besonders die Verteilung der Chromosomen auf neue Zellen werden gestört. Es treten weitere Chromosomenbrüche, Umlagerungen und Duplikationsfehler auf.

4 Mit wachsender Aneuploidie gerät die Proteinproduktion weiter aus dem Gleichgewicht, und die Zellen entwickeln zunehmend abnorme Merkmale, darunter ein atypisches Erscheinungsbild und eine beschleunigte Vermehrung – ein Tumor entsteht.

5 Bösartige Eigenschaften, wie die Fähigkeit, in benachbartes Gewebe einzudringen und anderswo Metastasen zu bilden, sowie eine Vorab-Resistenz gegen Medikamente, können zufällig ebenfalls infolge des chromosomalen Chaos in den Zellen entstehen, das von der wachsenden Aneuploidie herrührt.



JEN CHRISTIANSEN

der Aneuploidie ziehen Pathologen und Ärzte auch heute wieder heran, um das Krebspotenzial abnormer Zellen aus Gewebeproben zu beurteilen, die beispielsweise aus Gebärmutterhals, Prostata, Leber, Magen, Brust oder Rachenbereich entnommen wurden. Außerdem gilt ein hoher Grad von Aneuploidie als Zeichen für die Aggressivität eines Tumors.

Mittlerweile widmen sich Forscher mit neuen Verfahren wieder der Frage, ob sich bösartige Zellen durch chromosomale Veränderungen auszeichnen, die für die jeweilige Krebsart spezifisch sind. Fündig wurden viele. Selbst begeisterte Vertreter des Onkogen-Modells, die sich mit den Auswirkungen der Aneuploidie in bestehenden Tumoren befassten, stießen auf Hinweise, nach denen spezifische Veränderungen auf Chromosomen-Ebene – und nicht die Mutation bestimmter Gene – die Motoren der Bösartigkeit sind (siehe »Chaos in der Erbsubstanz«, Krebsmedizin II, Spektrum der Wissenschaft Spezial 3/03, S.12).

Fasziniert von dem enormen Potenzial chromosomaler Abweichungen, neue Zell-Phänotypen hervorzubringen (ganz ähnlich, wie chromosomale Veränderungen immer wieder in der Natur neue Arten erzeugt haben), fragten sich meine Kollegen und ich, wie die Chromosomen einer einzelnen Zelle sich so schnell verändern können, dass es zu Krebs kommt. Dies wollten wir herausfinden. Die Herausforderung war, eine Erklärung für die inhärente Instabilität von Tumorzellen zu finden, die zum Niedergang der ursprünglichen chromosomalen Krebstheorie geführt hatte.

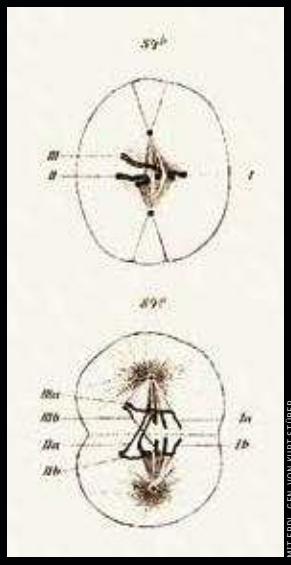
Krebs mit Genmutationen allein nicht erklärbar

Unsere Strategie bestand darin, jene Merkmale der Karzinogenese zusammenzustellen und zu analysieren, die sich mit der vorherrschenden Genmutationstheorie am wenigsten vereinbaren lassen. Letztendlich ermittelten wir sechs Eigenschaften von Krebs, die durch Genmutation allein nicht erklärbar sind, wohl aber durch Abweichungen bei den Chromosomen. Und tatsächlich kristallisierte sich so eine stimmige Theorie heraus.

Diesen Artikel haben wir für Sie freigeschaltet unter: www.spektrumverlag.de/artikel/849258

Systematische Anomalien?

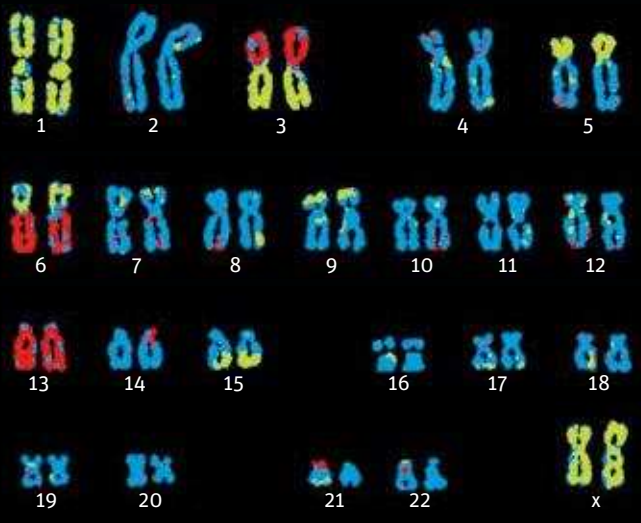
Im frühen 20. Jahrhundert stellte der deutsche Biologe Theodor Boveri eine Theorie auf, wonach Krebs durch Schäden an den Chromosomen entsteht. Grundlage hierfür waren seine Untersuchungen zur Embryonalentwicklung von Seeigeln (rechts). Boveris Erkenntnissen zufolge sollten die meisten aneuploiden Zellen nicht lebensfähig sein. In einigen Fällen jedoch – so seine These – könnte eine bestimmte Art von Verlust, Verdopplung oder Umordnung der Chromosomen dann einer Zelle und ihren Nachkommen die Fähigkeit verleihen, sich in Tumorzellen mit unkontrollierter Vermehrung zu verwandeln und schließlich Krebs hervorzurufen. Die kennzeichnenden chromosomalen Anomalien sollten daher in den meisten Tumoren eines Gewebetyps zu erkennen sein. Seit einiger Zeit lassen sich mittels neuer Methoden definierte DNA-Abschnitte sichtbar machen, und auf diesem Weg haben Forscher nun erste Chromosomenveränderungen identifiziert, die bei Tumoren verschiedener Patienten mit gleichem Krebstyp gehäuft vorkommen, und sogar in Zellen des Vorkrebs-Stadiums (unten). Solche gleichartigen Muster würden kaum auftreten, wenn die Aneuploidie nur die zufällige Folge des Übergangs zum Krebsstadium wäre und nicht die Ursache. Die Häufung spricht zu Gunsten der neuen Chromosomentheorie von Krebs.



MIT FRDL. GEN. VON KURT STUBER

Boveri dokumentierte mit diesen Zeichnungen 1888 die ungleiche Verteilung von Chromosomen (nummeriert) in einer sich teilenden Zelle bei einem Seeigel-Embryo. Die Ursache vermutete er in einem fehlerhaften Funktionieren der Spindelfasern, welche die verdoppelten Chromosomen auseinanderziehen.

Sichtbar gemachte Chromosomen-Anomalien bei einem Fall von Gebärmutterhalskrebs verraten, wo Abschnitte verloren gingen (rot markiert) oder hinzukamen (grün). Beim Vergleich mit entsprechenden Tumoren 29 anderer Patientinnen zeigten sich gewisse übereinstimmende Muster: In 23 Fällen lagen bestimmte Zugewinne an Chromosom 3 vor, und diese Tumoren entwickelten sich zu invasiven, Gewebegrenzen überschreitenden Karzinomen. In einem Drittel bis der Hälfte der Fälle zeigten sich überdies zusätzliches Genmaterial am Chromosom 1 sowie Verluste bei den Chromosomen 2, 3 und 4.



AUS: K. HESELMEYER ET AL.: ADVANCED-STAGE CERVICAL CARCINOMAS ARE DEFINED BY A RECURRENT PATTERN OF CHROMOSOMAL ABERRATIONS REVEALING HIGH GENETIC INSTABILITY AND A CONSISTENT GAIN OF CHROMOSOME ARM 3Q. IN: GENES, CHROMOSOMES AND CANCER 1997, BD. 19, NR. 4; MIT FRDL. GEN. VON WILEY-LISS, INC., EINER TOCHTER VON JOHN WILEY & SONS, INC.

1. Das Krebsrisiko steigt mit zunehmendem Alter. Ungefähr jeder Dritte erkrankt im Laufe seines Lebens an Krebs. Selten geschieht das aber vor dem 50. Lebensjahr, erst dann steigt die Wahrscheinlichkeit rapide. Krebs ist also im Großen und Ganzen eine Alterskrankheit.

Stimmte die Genmutationstheorie seiner Entstehung, so sollte er dagegen bei Neugeborenen recht häufig vorkommen. Ihr zufolge sind rund ein halbes Dutzend Mutationen in bestimmten Genen nötig, um eine maligne Entartung auszulösen. Einige dieser Veränderungen werden sich sicherlich im Erbgut vieler Menschen über die Generationen ansammeln, ähnlich wie SNPs. Ein Baby könnte somit zum Beispiel drei von sechs hypothetischen Darmkrebs-Mutationen von seiner Mutter erben und zwei von seinem Vater. Es hätte dann ein äußerst hohes Krebsrisiko, da die fehlende sechste Mutation jederzeit in einer seiner Milliarden Darmzellen auftreten könnte. Manch ein Baby dürfte sogar von Anfang an alle sechs geerbt haben. Dennoch kennt man keinen einzigen Fall von Darmkrebs bei Kindern. Sogar Labormäuse, die gezielt genetisch so verändert wurden, dass sie von Geburt an ein Sortiment vermeintlicher, weitervererbbarer Krebsmutationen tragen, gedeihen und pflanzen sich fort – und das häufig, ohne mehr Tumoren zu entwickeln als ihre normalen Vettern im Labor.

Im Hinblick darauf argumentieren einige Verfechter der Mutationstheorie, dass nur in seltenen Fällen eine genetische Veranlagung für Krebs besteht (ihrer Ansicht nach in Form ererbter onkogener Mutationen) und dass ansonsten alle solchen als kritisch erachteten Mutationen nach der Geburt neu aufgetreten sein müssen. Diese Annahme bedeutet jedoch eine weit über der Norm liegende natürliche Genmutationsrate über die Lebensspanne eines Individuums: Normal ist eine Mutation pro Gen bei etwa einer Millionen Zellteilungen. Eine Kombination von sechs speziellen Mutationen pro Zelle ist damit so selten, dass es praktisch keinen Krebs geben könnte.

Zu den seltenen Ausnahmen von der Regel, dass Krebs vor allem im Alter auftritt, gehören interessanterweise Kinder mit einer angeborenen Aneuploidie, wie beim Down-Syndrom, oder mit einer erblichen Chromosomen-Instabilität, wie dem Variablen Aneuploidie-Mosaik-Syndrom (es führt ebenfalls zu schweren geistigen Behinderungen). Im letzten Fall ist der Aufbau des Spindelapparats in den Zellen gestört, sodass an zufälligen Stellen im Körper immer wieder Zellen mit abnormem Chromosomenbild entstehen. Fast ein Drittel dieser Kinder bekommt Leukämie

(einen Blutkrebs) oder ungewöhnliche bösartige Formen von Tumoren.

Eine angeborene Aneuploidie oder eine erbliche Anfälligkeit hierfür beschleunigt somit deutlich Prozesse, die zu Krebs führen. Die für aneuploide Zellen charakteristische Instabilität würde in der Tat erklären, warum die meisten Embryonen mit solchen chromosomalen Auffälligkeiten, wie Boveri es vor 100 Jahren erkannte, gar nicht lebensfähig sind – und damit auch, warum Neugeborene keinen Krebs haben und warum Krebs nicht erblich ist.

2. Karzinogene wirken erst mit langer zeitlicher Verzögerung. Für zahlreiche chemische Substanzen und für verschiedene Arten von Strahlung ist nachgewiesen, dass sie im Tierexperiment Krebs hervorrufen beziehungsweise dies häufig bei Menschen tun, die ihnen beispielsweise beruflich oder durch einen Unglücksfall ausgesetzt waren. Doch selbst die stärksten dieser so genannten Karzinogene führen nie sofort zu Krebs, nicht einmal in der höchsten Dosis, die ein Mensch noch überlebt. Die Erkrankung tritt hier vielmehr erst nach Jahren oder gar Jahrzehnten auf.

Setzt man dagegen Bakterien Substanzen aus, die nachweislich Mutationen verursachen, zeigen die Zellen innerhalb von Stunden erste neue Phänotypen, also neue Eigenschaften und Verhaltensweisen. In etwas größeren Organismen wie etwa Fliegen tritt dieser Effekt innerhalb von Tagen auf, ohne dass die veränderten Zellen sich wie Tumorzellen verhalten. Ein Genmutationsszenario erklärt daher nicht, warum Zellen, die Karzinogenen ausgesetzt waren, in einer Weise zu Krebszellen werden, als wären sie ein Unterwasservulkan, der erst nach vielen unsichtbaren Ausbrüchen als Insel auftaucht.

3. Karzinogene verursachen Aneuploidien – selbst wenn sie keine Genmutationen auslösen. Als Wissenschaftler die unmittelbaren genetischen Effekte von Karzinogenen in Zellen untersuchten, erwarteten sie Mutationen in vielen wichtigen Genen zu finden. Stattdessen stellte sich heraus, dass einige der wirksamsten bekannten Karzinogene keinerlei Mutationen auslösen, darunter Asbest, Teer, aromatische Kohlenwasserstoffe, Nickel, Arsen, Blei, bestimmte Farbstoffe, Urethan und Dioxin. Selbst dauerhaft vorhandene Fremdkörper (etwa nicht entfernte Granatsplitter) können Krebs erregende Effekte haben, ohne direkt mutagen zu sein. Hinzu kommt, dass zur Einleitung des Prozesses, der Jahre später einen bösartigen Tumor hervorbringt, nur eine vergleichsweise winzige Dosis eines Karzinogens erforderlich ist. Im Falle eines mutagenen Vertreters ist die Dosis über tausendfach geringer, als sonst zur Mutation eines bestimmten Gens nötig ist. Hingegen erwiesen sich die Chromosomen aller mit Krebs auslösenden Dosen behandelten Zellen als instabil, zeigten also häufiger als gewöhnlich Brüche und eine gestörte Struktur.

Diese Befunde deuten darauf hin, dass Karzinogene nicht als Mutagene wirken, sondern als »Aneuploidogene«. Mit der Genmutationstheorie ließ sich nie erklären, wie Karzinogene, die gar keine Mutationen erzeugen, Krebs verursachen können. Selbst mutagene Vertreter mögen die Krankheit in Wahrheit dadurch auslösen, dass sie die Chromosomen zerstören oder fragmentieren und so zu Aneuploidie führen. Strahlung beispielsweise bewirkt indirekt Mutationen; sie hinterlässt zunächst Brüche in den DNA-Strängen, und wenn dann zelleigene Reparaturproteine versuchen, den Schaden zu beheben, führt dies nicht selten zu Umlagerungen in der DNA-Sequenz eines Chromosoms.

Nichtmutagene Karzinogene wie aromatische Kohlenwasserstoffe erzeugen Aneuploidie wahrscheinlich auf andere Weise: Sie sind dafür bekannt, dass sie die Mikrotubuli depolymerisieren und damit zerstören. Diese Protein-Polymere haben als Zugseile der Spindel die wichtige Aufgabe, bei der Zellteilung die vorher verdoppelten Chromosomen zu trennen und gleichmäßig auf die Tochterzellen zu verteilen (siehe Kasten auf S. 58 und 59). Der gemeinsame Nenner aller Karzinogene scheint demnach zu sein, dass sie zur Aneuploidie führen.

4. Tumoren verschiedener Patienten zeigen gemeinsame Aneuploidie-Muster. Wäre das chromosomale Chaos nur ein Nebeneffekt von Krebs und nicht dessen Ursache, dann sollten sich Tumorzellen des gleichen Typs, aber von verschiedenen Patienten in dieser Hinsicht beliebig unterscheiden. Zwei Chromosomen-Färbetechniken, die vergleichende genomische Hybridisierung und die Fluoreszenz-In-Situ-Hybridisierung, haben jedoch erste charakteristische Muster in dem Chaos aufgedeckt. Dank dieser Verfahren lassen sich Chromosomenabschnitte gezielt mit »farbigen« Sonden, die an definierte DNA-Sequenzen andocken, markieren und verfolgen. Und das ermöglicht es, für jede gegebene Zelle ein Bild aller hinzugewonnenen, verlorenen oder umgelagerten Chromsomenteile zu konstruieren.

Viele Forscher haben inzwischen Hinweise auf »nicht zufallsgemäße« Aneuploidien gefunden: spezifische Veränderungen des Chromosomenbilds, die bei der jeweiligen Tumor-

Sechs Eigenschaften von Krebs, die durch Genmutation allein nicht erklärbar sind:

1. Das Krebsrisiko steigt mit zunehmendem Alter

2. Karzinogene wirken erst mit langer zeitlicher Verzögerung

3. Karzinogene verursachen Veränderungen in der Chromosomenzusammensetzung (Aneuploidien) – selbst wenn sie keine Genmutationen auslösen

4. Tumoren verschiedener Patienten zeigen gemeinsame Muster chromosomaler Veränderungen

art, etwa Brust- oder Gebärmutterhalskrebs, in den meisten Fällen vorkommen – wie von der ursprünglichen chromosomalen Krebstheorie vorhergesagt (siehe Abbildung rechts im Kasten S. 60). Vergangenes Jahr berichteten beispielsweise Forscher der Karolinska-Universitätsklinik in Stockholm (Schweden), sie hätten in den Zellen von zehn Patienten mit Burkitt-Lymphom häufig einen Stücketausch zwischen den Chromosomen 3, 13 und 17 festgestellt, außerdem charakteristische Verluste und Verdoppelungen von Segmenten bei den Chromosomen 7 und 20.

Die beobachteten Muster in den bösartigen Zellen verschiedener Patienten sind für den Gewebetyp charakteristisch, in dem der Krebs entstanden ist. Daher könnten sie durchaus Chromosomenveränderungen darstellen, die es der Ursprungszelle überhaupt erst ermöglicht haben, aus ihrer genetisch programmierten Entwicklung auszubrechen. Sie wären somit die minimal notwendigen Veränderungen, damit eine lebensfähige aneuploide Zelle dieser Gewebsart den Weg zur malignen Entartung einschlägt.

5. Krebszellen besitzen auch Eigenschaften ohne Überlebensvorteil

Charakteristische Muster fanden sich auch in anderer Hinsicht. So haben mehrere Forschungsgruppen festgestellt, dass bestimmte Veränderungen des Chromosomenbilds Hinweise auf Krebsstadium, Metastasierungspotenzial und sogar Medikamentenresistenz liefern. Die Gruppe an der Karolinska-Klinik beispielsweise beobachtete, dass ausgetauschte Teile in einem Abschnitt von Chromosom 17 sowie zusätzliche Stücke in Abschnitten von Chromosom 7 und 20 mit Medikamentenresistenz in Verbindung stehen.

Welche funktionellen Konsequenzen solche krebsspezifischen Aneuploidien haben, versuchen Wissenschaftler genauer herauszuarbeiten. Die Mengen der verschiedenen Genabschriften und Eiweißstoffe, die in Krebszellen hergestellt werden, erwiesen sich hierfür auch als aufschlussreich. Vielen Analysen zufolge entstehen die mutierten Proteinprodukte vermeintlicher Onkogene oft in normaler Menge. In neuerer Zeit gab es nun gleich mehrere interessante Ergebnisse, was die Proteinbalance anbelangt. Ein Beispiel: Wie eine Gruppe US-amerikanischer und israelischer Forscher bei Darmkrebszellen feststellte, wird dort von zahlreichen Proteinen zu viel oder zu wenig erzeugt – entsprechend den Veränderungen im chromosomalen DNA-Gehalt der Zellen. Mit höherem Aneuploidie-Grad wuchs auch das Missverhältnis der Gene samt ihrer Produkte und die Bösartigkeit nahm zu. Dies spricht deutlich für die Hypothese, dass Aneuploidie zu autonom agierenden und damit bösartigen Phänotypen führt, indem sie die Anzahl vieler tausend Gene auf einmal reduziert oder erhöht. (Nebenbei: Etwa jedes 250. Gen, das für ein Protein kodiert, zählt inzwischen als Onkogen.)

5. Krebszellen besitzen auch Eigenschaften ohne Überlebensvorteil für sie. Hierzu gehören einige sehr häufige und überaus gefürchtete ihrer Merkmale. So sind manche Tumoren von Anfang an gegenüber Arzneimitteln resistent, wenn also noch gar keine Berührung damit bestand, die dieses Merkmal zum Überlebensvorteil gemacht hätte. Und die Fähigkeit, Metastasen zu bilden, trägt nicht dazu bei, dass sich Tumorzellen an ihrem Entstehungsort gegenüber normalen Zellen besser durchsetzen können. Mutationen einzelner Gene, die ohnehin sehr selten auftreten, blieben aber nur dann durch Auslese (sprich Selektion) erhalten, wenn sie für die Tumorzellen von Vorteil wären. Daher liegt die Wahrscheinlichkeit praktisch bei null, dass ein unbehandelter Tumor durch zufällige Genveränderungen in all seinen Zellen eine Medikamentenresistenz entwickelt.

Bei Anomalien auf der Chromosomen-Ebene dagegen sind fast immer Tausende von Genen gleichzeitig betroffen. Einmal angenommen, eine Batterie von Genen »fährt per Anhalter« auf einem Chromosom mit, das für die Karzinogenese selektioniert worden ist – dann wird der entsprechende Tumor »kostenlos« Eigenschaften miterwerben, die für die Krebsentstehung gar nicht nötig sind. Gestützt wird diese Möglichkeit durch Indizien dafür, dass Medikamentenresistenz wie auch Metastasierungsfähigkeit mit bestimmten chromosomalen Veränderungen assoziiert sind. Und da ein typischer Tumor Millionen nicht identischer Zellen enthält, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass resistente Zellen bereits zu Beginn der Therapie vorhanden sind und dass er damit sehr rasch insgesamt Resistenz und andere neue Merkmale entwickelt.

6. Krebszellen verändern sich viel schneller als Gene

6. Krebszellen verändern sich viel schneller als Gene. Sie bringen im Eiltempo neue Phänotypen hervor oder verlieren alte, obwohl zahlreichen Studien zufolge die Genmutationsrate in Tumorzellen in über 90 Prozent der Fälle nicht höher ist als in gesunden Zellen. Bei normaler Rate sind die Chancen aber zu gering, dass ein bestimmtes Gen durch Mutation so rasch ein neues Merkmal oder Verhalten hervorbringt, wie man es bei Krebszellen beobachtet.

Veränderungen des Karyotyps hingegen könnten, so unsere Hypothese, einen rasanten Wandel bewirken. Dazu untersuchte unsere Gruppe jüngst hoch aneuploide menschliche Brust- und Darmkrebszellen auf solche Verän-

Science-Shop.de

vor allem Wissen

Science & Fun im Science-Shop

■ H-Racer-Set

Modellauto mit Brennstoffzelle und eigener solarbetriebener Wasserstofftankstelle

Anleitung in dt. Sprache, benötigt wird destill. Wasser, nicht im Lieferumfang enthalten. Abmessung d. Modellautos: ca. 16 x 7 cm. HORIZON.

Bestell-Nr. 2424. **€ 99,– (D),** € 99,– (A)

Erleben Sie spielerisch die moderne Wasserstofftechnologie: Statt Strom aus Batterien speichert das Fahrzeug Wasserstoff und setzt es in einer Brennstoffzelle in elektrische Energie um. Die mitgelieferte Wasserstoff-Tankstelle versorgt das Fahrzeug unbegrenzt mit sauberer Energie. Alles was Sie benötigen ist Wasser und Sonnenlicht: eine nahezu unbegrenzte Ressource!

■ Laserpod Galaxy

Die Lava-Lampe für das 21. Jahrhundert

Höhe: 11,5 cm; mit Aufsatz: ca. 27,5 cm, Ø 8,4 cm, Laserpod: Aluminium, Gewicht ca. 450 g, Netzteil im Lieferumfang enthalten.

Bestell-Nr. 2296.

€ 99,– (D), € 99,– (A)

Laserpod ist die neueste Entwicklung des britischen Lichtkünstlers Chris Levine.

Im Inneren des Laserpod strahlen zwei blaue und eine violette LED sowie 3 rote Laser. LEDs und Laser werfen ihr Licht auf eine Kristallkugel, die das Licht mehrfach bricht und letztendlich an Decke, Wand etc. projiziert. Durch die Drehung des Kristalls entstehen immer wieder neue, einzigartige Lichtbilder. Zusätzlich wird eine Glaslinse mitgeliefert, die auf dem Laserpod gesetzt werden kann. Wer den Laserpod lieber als innovative Tischlampe nutzen möchte, kann einen der beiden Aufsätze verwenden und sich so von der Lavalampe des 21. Jhdts begeistern lassen.

■ Pen Ultimate

Bestell-Nr. 1667.

€ 13,90 (D), € 14,20 (A)

Der schwebende Pen Ultimate ist ein Blickfang für Ihren Schreibtisch. Der Kugelschreiber schwebt in einer speziellen Halterung und kann um die Längsachse in Rotation gebracht werden.

■ Astra Plus satellitengestützte Funkwetterstation

Mit WETTERdirekt-Technologie

Detail. Darstellung mit 36 verschd. Wettersymbolen, Anzeige der voraussichtl. Höchst- u. Tiefstwerte für jeden Tag, Außentemp. u. Luftfeuchtigkeit über kabellosen Außensender (868 MHz), besonders hohe Reichweite bis 100 m (Freifeld), Innentemp., Uhrzeit m. Weckalarm u. Datum, Gehäuse perlmuttweiß, inkl. Batterien 2 x C für Empfänger, 2 x AA für Sender, 150 x 150 x 55 mm, 586 g. TFA Dostmann.

Bestell-Nr. 2374. **€ 59,90 (D),** € 59,90 (A)

WETTERdirekt revolutioniert Ihre Wettervorhersage! Denn mit WETTERdirekt erhalten Sie eine regionale Wetterprognose, von professionellen Meteorologen erstellt, per Satellitentechnik kostenlos und vollautomatisch auf Ihre Station.

Portofreie Lieferung in D & A ab einem Bestellwert von € 20,–*

■ Kosmos Astronomie-Puzzle Kassiopeia, 1000 Teile

2007, Format: 66 x 47 cm, Kosmos.

Bestell-Nr. 2297. **€ 9,95 (D),** € 10,30 (A)

Dieses Puzzle zeigt den Supernova-Überrest Cassiopeia A, die hellste Radioquelle am Himmel. Der Überrest stammt von einer Supernovaexplosion, die sich – von den Menschen unbemerkt – vor 325 Jahren ereignete und einen Neutronenstern hinterließ.

■ Der Stirling-Motor Kartonbausatz

Kartonbausatz für einen voll funktionstüchtigen Stirling-Motor

2006, SunWatch.

Bestell-Nr. 2321.

€ 21,90 (D), € 21,90 (A)

Setzen Sie diesen voll funktionstüchtigen Stirling-Motor auf eine Tasse mit kochend heißem Kaffee (oder eine Kaltkompresse), geben Sie dem Schwungrad einen kleinen Schubs nach links, und der genügsame Apparat beginnt leise zu stampfen – bis zu einer Stunde lang! Bausatz aus stabilem, gestanztem Karton in liebevoll gestaltetem Golddruck, komplett mit allem Zubehör, darunter lasergeschnittene Aluminium-Bleche, reibungsarme Kunststoff-Achslager und Drahtbiegeteile aus Federstahl. Höhe 16,5 cm, Breite und Tiefe je 12,6 cm.

■ Hydrogen Fuel Cell Car Kit

Modellfahrzeug mit Brennstoffzelle

Anleitung in engl. Sprache. Abmessung des Modellautos: ca. 24 x 10,5 cm. Benötigt wird destill. Wasser u. Batterien (2 x AA), nicht im Lieferumfang enthalten. HORIZON.

Bestell-Nr. 2423. **€ 59,– (D),** € 59,– (A)

Wasserstoff ist ein wichtiger Energieträger für erneuerbare Energien der Zukunft. Dieses kleine Modellfahrzeug verdeutlicht die Funktionsweise der Wasserstofftechnologie: Zuerst zerlegt eine Brennstoffzelle Wasser in seine Bestandteile Wasser- und Sauerstoff. Mit dem gespeicherten Wasserstoff kann dann das Fahrzeug für einige Minuten betrieben werden, indem dieselbe Brennstoffzelle umgekehrt wieder Strom aus der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt. Der besondere Clou: Das Fahrzeug weicht automatisch Hindernissen aus und blinkt dabei fröhlich über zwei LEDs vor sich hin.

■ Stirlingmotor Solar Stahl

Motor ca. 13 cm hoch m. einem Grundflächendurchmesser v. 10 cm. Schwungrad aus poliertem Messing, die Teile d. Grundkörpers bestehen aus poliertem Edelstahl, AERO.

Bestell-Nr. 2219.

€ 199,– (D), € 199,– (A)

Dieser Stirlingmotor läuft sogar mit Licht!

Die obere Gehäuseplatte wurde aus Acrylglas gefertigt, um Sonnenlicht oder das Licht einer Lampe auf die Oberseite des Verdrängerkolbens gelangen zu lassen. Dort erwärmt sich die Luft, wodurch der Motor nach dem Stirlingprinzip arbeiten kann. Dieser Stirlingmotor läuft aber auch, wenn er einseitig – z. B. von unten – erwärmt wird. Als Wärmequellen bieten sich zahlreiche Möglichkeiten des Haushalts an und sogar die menschliche Hand. Je größer die Temperaturdifferenz ist, umso schneller läuft er. Interessanterweise läuft er rückwärts, wenn er auf einen kalten Untergrund gestellt wird.

■ Pocket-Quiz-Paket Gehirntraining

NEU

Logisches Denken, Optische Illusionen, Gehirnjogging

Je 50 Übungskarten, 10 x 6 x 2 cm, in Schachtel, Moses. *Bestell-Nr. 2469.*

€ 14,85 (D), € 15,30 (A)

Fördern Sie geistige Fitness, logisches Denken, optisches Sehen und Ihre Kombinationsfähigkeit. Auch für unterwegs sehr gut geeignet, denn »Pocket-Quiz« passt in jede Hosentasche.

Besuchen Sie uns im Internet unter:

www.science-shop.de

Bequem bestellen:

→ direkt bei www.science-shop.de

→ per E-Mail: info@science-shop.de

→ telefonisch 06221/9126-841

→ per Fax: 0711/7252-366

→ per Post: Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

*Bestellungen in D & A unter € 20,– sowie Bestellungen im sonst. Ausland berechnen wir mit € 3,50. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsges. mbH

derungen und ermittelte die Rate, mit der dort Resistenzen gegenüber zelltoxischen Medikamenten entstehen. Tatsächlich kam es mindestens einmal alle 100 Zellgenerationen zu Karyotyp-Veränderungen – solche, die spezifisch die Arzneimittelresistenz betrafen, traten einmal alle 1000 bis 100 000 Generationen auf. Kurzum: Aneuploide Zellen wandeln ihre Chromosomen und ihre Phänotypen viel schneller als Mutationen ihre Gene.

Wie diese und ähnliche Experimente zudem zeigten, traten weitere chromosomale Abweichungen umso schneller auf, je höher der Aneuploidie-Grad der Krebszellen war. Eine solche Korrelation spricht für die Schlussfolgerung, dass die Aneuploidie selbst als Katalysator der beobachteten Chromosomen-Instabilität von Krebszellen wirkt. Ist die teuflische Spirale erst einmal in Gang, erzeugt jede Zelle nach dem Zufallsprinzip eigene neue Phänotypen. Damit ließe sich auch erklären, was Leslie Foulds vom Royal Cancer Hospital in London schon vor Jahrzehnten beobachtete: Zwei Tumoren sind niemals genau gleich, selbst wenn sie aus demselben Gewebe stammen oder experimentell auf dieselbe Weise erzeugt wurden. Sie entwickeln sich unabhängig voneinander nach den Gesetzen des Zufalls und der Selektion.

Gerade diese Individualität ist eine weitere charakteristische Eigenschaft von Krebs, die sich nicht durch die Aktivität oder Inaktivität bestimmter Gene erklären lässt. Denn wenn ein bestimmtes Gen ausfällt oder dauerhaft überaktiv wird, sollte dies jedes Mal und bei jeder Zelle die gleiche Wirkung haben.

Da alle außergewöhnlichen Aspekte der Krebsentstehung, bei denen die Mutationstheorie versagt, mit chromosomalen Veränderungen zu tun haben, schlagen wir eine revidierte Fassung der Chromosomentheorie von Krebs vor, die auch dessen charakteristische Instabilität erklärt.

Betrachtet man Krebs als »chromosomale Krankheit«, ergibt sich folgendes Bild. Karzinogene, seltene Erbkrankheiten oder zufällige Fehler bei der Verteilung der Chromosomen während der Zellteilung induzieren unspezifische Aneuploidien. Damit geraten tausende Gene und ihre Proteinprodukte aus der Balance, was weitere Fehler bei der Verdopplung und Verteilung der Chromosomen nach sich zieht. Die ausgelöste Kettenreaktion sorgt also für immer neue Störungen des Chromosomenbilds. Dieser dynamische, sich selbst verstärkende Zustand wird zum steten Quell von karyotypischen Varianten, aus denen, nach klassisch darwinistischem Konzept, durch natürliche Auslese »egoistischer« Chromosomenkombinationen dann autonome Krebszellen hervorgehen. (Egoistisch heißt eine solche Kombination, weil deren Träger sich auf Kosten anderer besser vermehrt und durchsetzt.) Im Grunde handelt es sich dabei um neue, parasitäre Zellarten mit instabilem Karyotyp.

Sobald einmal die Kettenreaktion zu krebsspezifischen chromosomalen Veränderungen angestoßen ist, können rasch neue, kostenlos miterworbene Eigenschaften wie Medikamentenresistenz und Metastasierungsfähigkeit entstehen, die der Zelle zunächst keinen Vorteil gegenüber ihrem Umfeld verschaffen, aber für den Patienten tödliche Gefahr bedeuten.

Feuer mit Feuer bekämpfen?

Wegen der inhärenten Instabilität von Krebszellen ist es auch wenig aussichtsreich, Tumoren mit einem einzelnen Medikament zu behandeln, insbesondere wenn dieses nur auf ein verändertes Gen oder dessen Produkt zielt. Einige Forscher haben unlängst vorgeschlagen, Feuer mit Feuer zu bekämpfen, und zwar in Form von Therapien, die Schäden an der Chromosomen-DNA fördern und die Aneuploidie rascher fortschreiten lassen. Auf diese Weise, so die Hoffnung, könnten die Tumorzellen so instabil werden, dass sie nicht länger lebensfähig sind. Die Gefahr besteht aber, dass die Methode auch die Chromosomen normaler Zellen destabilisiert und dadurch sogar Krebs auslösen könnte. Das heißt, sie dürfte nur schwer kontrollierbar sein.

Das langsame Fortschreiten von der ersten unspezifischen Aneuploidie bis hin zu einem aggressiven Tumor bietet Ärzten aber die große Chance, anhand einer noch präkanzerösen Aneuploidie einen potenziellen Krebsherd zu entdecken und operativ zu entfernen, noch bevor er das bösartige Stadium erreicht. Darüber hinaus ließen sich frühe Krebsstadien von morphologisch identischen gutartigen Tumoren anhand der Aneuploidie unterscheiden. Bei fortgeschritteneren Tumoren könnten Chromosomenmuster, die mit Medikamentenresistenz oder Metastasierungsfähigkeit assoziiert sind, für Therapieentscheidungen herangezogen werden.

Schließlich ließe sich auch die Krebsprävention deutlich verbessern, indem man Nahrungsmittel, Medikamente und Umwelt auf Substanzen untersucht, die Chromosomenschäden hervorrufen und somit als Aneuploidie-Induktoren potenzielle Karzinogene darstellen. Ich bin deshalb optimistisch, dass Forscher, wenn sie die chromosomale Theorie von Krebs berücksichtigen, die furchtbare Krankheit am Ende verstehen werden – und dass daraus dann eine wirksamere Vorbeugung, zuverlässigere Diagnosen von Vorstufen und bessere Therapien von Krebs entspringen. ◁

Peter Duesberg ist Professor für Molekular- und Zellbiologie an der Universität von Kalifornien in Berkeley, wohin er 1964 aus Deutschland kam. Er isolierte 1970 aus dem Rous-Sarkom-Virus, dessen gesamtes Genom er kartierte, das erste echte Onkogen. Zehn weitere Sarkom- und Leukämie-Gene von Viren aus Mäusen und Vögeln folgten. 1986 wurde Duesberg in die National Academy of Sciences der USA gewählt. Anders als seine höchst umstrittene Auffassung zur Ursache der Immunschwächekrankheit Aids ist seine hier dargelegte kontroverse Vorstellung, dass Chromosomen-Anomalien die Wurzel von Krebs seien, auch Forschungsgegenstand der Mainstream-Wissenschaft.

Cancer drug resistance: The central role of the karyotype. Von Peter Duesberg et al. in: Drug Resistance Updates, Bd. 10, S. 51, 2007

The chromosomal basis of cancer. Von Peter Duesberg et al. in: Cellular Oncology, Bd. 27, Nr. 5–6, S. 293, 2005

The sigmoidal curve of cancer. Von Roberto P. Stock und Harvey Bialy in: Nature Biotechnology, Bd. 21, S. 13, 2003

Debate surges over the origins of genomic defects in cancer. Von Jean Marx in: Science, Bd. 297, S. 544, 2002

Weblinks zu diesem Thema:
www.spektrum.de/artikel/903042

Weitere relevante Informationen aus dem Spektrum-Verlag:
www.spektrum.com/krebs

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Was ist Leben?

Ob wir fremde Lebensformen immer erkennen würden, ist fraglich.

Von Robert Hazen

Es ist wie in der Geschichte von den Blinden, die einen Elefanten beschreiben sollen: Jeder bekommt etwas anderes zu fassen

Wohl keine Entdeckung hätte tiefere Nachwirkungen, als wenn wir eine »zweite Schöpfung« fänden – Lebendigkeit, die unabhängig vom irdischen Leben entstand. Bisher kennen wir nur diese eine belebte Welt. Noch könnte es sein, dass unsere Biosphäre einzigartig ist, dass wir im Universum wirklich allein sind. Sollten wir allerdings ein anderes Leben aufspüren, hieße das: Leben ist ein universales Prinzip. Obwohl noch niemand beweisen konnte, dass es im Kosmos von Leben wimmelt, sind sich viele dessen sicher. So manchen von uns drängt es darum zur jungen Disziplin der Astrobiologie. »Die einzige Wissenschaft ohne Gegenstand« nannte ein Schelm dieses Forschungsfeld.

Dem Irdischen verhaftete Biologen verstehen sich vorzüglich darauf, Lebensspuren zu erkennen. Ihnen genügt hierfür eine einzige Zelle, ein Schnipselchen DNA, eine eigentümliche Ansammlung von Kohlenstoffmolekülen. Nur handelt es sich um hiesige Erscheinungen. Was, wenn fremdes Leben anders aussähe, wenn es sowohl äußerlich wie biochemisch völlig exotisch daherkäme? – »Ich erkenne so etwas, wenn ich es sehe!« Was der amerikanische Richter Potter Stewart 1964 über Pornografie behauptete, dürfen wir uns bei außerirdischem Leben nicht anmaßen. Was bleibt uns also?

Weil Forscher Wert auf klare Verhältnisse legen, diskutieren sie wichtige Angelegenheiten auf Kongressen. Vor nicht langer Zeit trafen sich zum Thema »Was ist Leben?« einige hundert Naturwissenschaftler mit Philosophen und Theologen. Die Anschauungen prallten aufeinander. Die hitzigsten Dispute lieferten sich allerdings die Naturwissenschaftler selbst. Ein ehrwürdiger Lipidforscher setzte auseinander, Leben habe mit der ersten semipermeablen Lipidmembran begonnen. Eine ebenbürtige Autorität der Stoffwechselforschung konterte, es habe mit dem ersten Stoffwechselzyklus angefangen, der sich selbst in Gang hielt. Wieder eine völlig andere Auffassung vertraten einige Molekularbiologen. Ihres Erachtens stellte ein RNA-ähnliches genetisches System die erste Lebensform dar, das biologische Information trug und verdoppelte. Vergleichsweise wenige Anhänger fand ein Mineraloge mit seinem Vorschlag, sich selbst replizierende Mineralien hätten den Anfang gemacht.

AG. FOCUS / SPL, STEVE GSCHMEISSNER

Sogar manche irdischen Lebensformen würden Unkundige kaum für Organismen oder organismische Strukturen halten – etwa solche Skelette von Radiolarien, Einzellern des Planktons.

Diese Debatte kocht weiter. Sie erinnert an die Geschichte von den Blinden, die einen Elefanten beschreiben sollen. Weil jeder einen anderen Körperteil zu fassen bekommt, entwerfen die Männer völlig verschiedene Tiere. Keines der Bilder trifft zu, weil keines den ganzen Elefanten zeichnet. Dennoch enthält jede Beschreibung etwas Richtiges. Vielleicht ist es bei unserem Thema ähnlich. Vielleicht behandelt jede Theorie zum Wesen des Lebens einen anderen Ausschnitt einer viel komplexeren Wahrheit.

Fünfzig verschiedene Definitionen

In seinem 1999 erschienenen Buch »Biogenesis, Theories of Life's Origin« listet der Chemiker Noam Lahav von der Universität Jerusalem Lebensdefinitionen auf, an denen sich 48 Experten in den letzten hundert Jahren versuchten. Der namhafte englische Evolutionsforscher John Maynard Smith (1920–2004) beispielsweise versteht unter Leben »jede Population von Einheiten, die einer Vermehrung, Vererbung und Variation fähig sind«. Dagegen konstatiert der Informationstheoretiker Stuart Kauffman von der Universität Calgary (Alberta, Kanada), Leben sei »ein zu erwartendes kollektives Vermögen katalytischer Polymere zur Selbstorganisation«. Bei anderen Experten ist es »die Fähigkeit zu kommunizieren«, »ein Fluss von Energie, Materie und Information« oder »ein sich selbst erhaltendes chemisches System, das eine darwinische Evolution erfahren kann«. Keine zwei der vielen Definitionen gleichen sich völlig.

Vielleicht sollte uns das nicht einmal überraschen. Schließlich reiben sich nicht nur Naturwissenschaftler an diesem Thema. Auch Bioethiker und Theologen befassen sich damit – etwa in der Frage, wann das Leben eines menschlichen Embryos beginnt. Setzt es mit der Empfängnis ein oder erst, sobald das Gehirn reagiert? Oder mit den ersten Herzschlägen? Für das andere Ende menschlicher Existenz verlangen Ärzte und Juristen eine Abklärung. Hier geht es um einen ethisch vertretbaren Umgang etwa mit Hirntoten sowie anderen nie mehr reaktionsfähigen Komapatienten.

Die Bemühungen von Seiten der Naturwissenschaften um eine Definition des Lebens sind zwar in ethischer Hinsicht weniger komplex und auch emotional nicht so stark beladen. Trotzdem ist der mangelnde Konsens unbefriedigend. Wie soll jemand sicher wissen, ob er außerirdisches Leben entdeckt hat,

Die eine Definition des Lebens ist genauso brauchbar wie jede andere – bis wir mehr darüber herausfinden, was außerhalb unserer Welt existiert

wenn nicht einmal festgelegt werden kann, was Leben ist. Gleiches gilt für Forscher, welche die Entstehung irdischen Lebens aufklären möchten. Hierbei hilft es nichts, dass Generationen von Biologen Lebewesen im Großen wie im Kleinen untersucht haben. Auch da gibt es einfach keine allgemeinen Kriterien, um alle nur denkbaren Lebensformen eindeutig von den unzähligen unbelebten Erscheinungen trennen zu können.

Die betreffenden Wissenschaftler begehren aber Eindeutigkeit. Es gibt zwei Lager, die sich von entgegengesetzten Seiten her dem Ziel nähern, Lebendes von nicht Lebendem unterscheiden zu können. Die Mehrheit geht sozusagen von oben nach unten vor. Diese Leute sondieren alles, was an heutigen und fossilen Organismen greifbar ist. So hoffen sie zu erkennen, was das primitivste noch vorhandene Leben und ihm nahe Erscheinungen ausmacht – oder was das einfachste jemals existente bestimmte. Dieser Ansatz hat Grenzen. Alle bekannten Lebensformen, auch die ausgestorbenen, beruhen auf hoch entwickelten Zellen mit DNA und Proteinen (auch Viren stützen sich darauf). Deswegen greifen mit dieser Methode gewonnene Definitionen zu kurz.

Eine kleine Fraktion von Forschern nimmt den Weg von unten nach oben. Diese Wissenschaftler versuchen die frühen Bedingungen der Erde – die Chemie der Urwelt – im Labor nachzubauen. Das Fernziel ist, ausgehend von einfachen Bausteinen ein chemisches System zu schaffen, welches lebt. Erfolge hiermit könnten den Übergang von unbelebter zu lebender Materie erhellen. Fragt man diese Forscher, was denn lebendig ist, hört man eine erfrischende Meinungsvielfalt. Jeder von ihnen orientiert sich da weit gehend an seiner eigenen Spezialrichtung, je nachdem, ob derjenige an Zellmembranen oder Stoffwechselzyklen, an RNA oder Viren arbeitet. Sogar eine halbleiterbasierte künstliche Intelligenz findet ihre Fürsprecher.

Philosophen und Theologen tragen eine abstraktere Sicht bei. Sie sinnieren über die gesamte Bandbreite von Phänomenen, die irgend als lebendig bezeichnet werden könnten. Roboter, Computer, sogar ein sich seiner selbst bewusstes Internet führen sie an. Manchmal fühlt man sich auf diesen Treffen wie auf einer Sciencefiction-Veranstaltung. Trotzdem sind solche Debatten nicht reine Spielerei. Die Nasa benötigt für zukünftige Missionen, die nach außerirdischem Leben suchen sollen, eine klare Vorgabe.

Kompromisse zu finden gehört nicht unbedingt zu den herausragenden Qualitäten von Wissenschaftlern. Gerald Joyce vom Scripps-Forschungsinstitut in La Jolla (Kalifornien) hat sich darin als Mitglied eines Exobiologie-Gremiums der Nasa dennoch versucht. Von ihm stammt die weiter oben als letzte aus Lahavs Buch zitierte Formulierung: Leben sei »ein sich selbst erhaltendes chemisches System, das eine darwinische Evolution erfahren kann«. Dies schlug Joyce 1994 als »Arbeitsdefinition« für die Weltraumforschung vor.

Außerirdisches Leben könnte für uns unfassbar sein

Diese prägnante, oft zitierte Formel vereint drei wesentliche Aspekte. Zum einen verlangt sie ein chemisches System. Computerprogramme, Roboter und andere elektronische Konstrukte leben demnach nicht. Des Weiteren fordert diese Formulierung Wachstum und Selbsterhalt durch Energie- und Materialaufnahme aus der Umwelt – im Kern also Stoffwechsel. Drittens wäre nur lebendig, was sich verändert, was Varianten seiner selbst hervorbringt. Weil dann Umweltbedingungen fähigere Einheiten selektierten, fände eine Evolution hin zu komplexeren Gebilden statt. Wahrscheinlich ist diese für die Nasa gedachte Definition von Leben mindestens so allgemein gültig, brauchbar, knapp und genau wie jede andere Formulierung, die gefunden werden mag – wenigstens bis wir mehr darüber herausfinden, was außerhalb unserer Welt existiert.

Mit dieser Fassung ist vorstellbar, dass das erste irdische Leben vielleicht völlig anders aussah als alles, was wir heute kennen. Nach Ansicht vieler Forscher war die erste Lebenseinheit keineswegs eine einzelne Zelle im heutigen Sinne, denn selbst einfachste Zellen weisen bereits eine ungeheure Komplexität auf. Vermutlich verwendete die erste Lebensform auch nicht DNA. Unser genetischer Kode ist schon viel zu kompliziert. Das erste Leben benutzte auch nicht notwendigerweise Proteine, die Stützen im Stoffwechsel von Zellen.

Ich bin Geologe und kenne mich mit Gesteinen aus. Meine Lieblingshypothese lautet: Die erste Lebensform, welche die Nasa-Definition erfüllen würde, war ein Molekülfilm auf Gesteinsoberflächen. Solch ein »Flachleben« hätte eine wenige Nanometer dicke Schicht gebildet, die wuchs, sich von den energiereichen Mineralien des Gesteins ernährte und sich langsam über die nächsten Felsen ausbreitete, etwa wie Flechten. Falls solches Leben auf der Erde heute noch existiert – wie sollen wir es erkennen, da ihm doch die üblichen Kriterien DNA und Proteine fehlen?

Womöglich sind die Bemühungen um eine eindeutige Abgrenzung einfach deswegen zum Scheitern verurteilt, weil der Übergang zum Leben allmählich und schrittweise geschah.

Spuren außerirdischen Lebens? Diese wurmartigen Strukturen entdeckten Forscher auf einem Meteoriten vom Mars, der in der Antarktis niedergegangen war.

NASA, JSC

Nach dem französischen Ethnologen und Anthropologen Claude Lévi-Strauss (geb. 1908), der sich mit den Mythologien vieler Kulturen befasste, neigen Menschen von Natur aus zum »Dichotomisieren«. Komplexe Situationen reduzieren sie gern auf ein viel zu einfaches Gegensatzpaar – wie Freund und Feind, Himmel und Hölle, Gut und Böse.

Wie die Wissenschaftsgeschichte zeigt, sind auch Forscher davor nicht gefeit. Zum Beispiel stritten im 18. Jahrhundert die Neptunisten mit den Plutonisten. Die Neptunisten glaubten, die Gesteine seien aus dem Urmeer, durch Ablagerungen aus wässrigen Lösungen hervorgegangen. Die Plutonisten dagegen waren davon überzeugt, dass die Hitze aus dem Erdinneren wesentlich zur Gesteinsbildung beitrug. Im Grunde hatten beide in gewissem Maße recht.

Eine ebenfalls hitzige und letztlich irreführende Kontroverse zur geologischen Geschichte der Erde entspann sich damals zwischen den Anhängern der Katastrophen- oder Kataklysmentheorie und den Uniformitariern. Die einen hielten eine kurze, von Vernichtung und Neuschöpfung geprägte Erdgeschichte für wahr. Die anderen setzten auf immer noch anhaltende, graduelle, gleichförmig-langsame geologische Vorgänge. Und ein modernes Beispiel: Die einst streng gezogenen Grenzen zwischen Pflanzen und Tieren oder zwischen Einzellern und mehrzelligen Organismen erweisen sich jetzt als unscharf.

Jeder Versuch, Lebendiges und Unbelebtes ein für alle Mal per Definition klar zu unterscheiden, kann nur eine falsche Zweiteilung liefern. Die erste komplette Zelle erschien eben nicht plötzlich aus dem Nichts. Leben dürfte vielmehr aus einer Abfolge von aufeinander fußenden jeweils neuartigen Phänomenen hervorgegangen sein. Auf etliche Ereignisse organischer Synthese folgten: molekulare Selektion, Konzentration, Abgrenzung, Organisation in diverse molekulare Strukturen. Eine molekulare Evolution trat auf, als die sich selbst replizierenden Moleküle immer komplexer und veränderlicher wurden. Diese Evolution wirkte durch eine natürliche Selektion, die dem Wettbewerb um begrenzte Rohmaterialien entsprang.

Wegen der heute aufscheinenden mutmaßlich tiefen Kluft zwischen Unbelebtem und Lebendigem ist jene stufenweise chemische Evolution von immer komplexeren Stadien jetzt verschattet. Sobald die ersten Zellen aufkamen, haben sie rasch so gut wie alle Spuren der früheren Stadien dieser chemischen Evolution vertilgt. Gefräßig, wie es war, nutzte das zelluläre Leben jenes »Protoleben« als reiche Nahrungsressource und rottete es dabei aus.

Die Aufgabe lautet somit nicht, die ultimative Definition von Leben zu finden. Vielmehr sollten wir uns damit befassen, in welchen – zunehmend hierarchischen – Schritten es möglich wurde, dass schließlich zelluläres Leben auf der präbiotischen, mit organischen Molekülen angereicherten Erde auftrat. Art und Abfolge könnten je nach Umgebung verschieden gewesen sein. Vielleicht finden wir die wirkliche Reihenfolge ja nie heraus, die sich auf unserer Erde abspielte – oder die Reihenfolgen. Allerdings vermuten viele Forscher, dass der Weg zu jeder Zeit zumindest chemisch stets ähnlich verläuft – verlaufen muss – und zudem nicht umkehrbar ist, egal, auf welchem bewohnbaren Himmelskörper sich das Phänomen abspielt.

Für eine Definition ist es zu früh

Für Definitionsbemühungen ist solch ein mehrstufiges Szenario durchaus erhellend. Grundsätzlich ist nämlich jede Festlegung auf eine Komplexitätsstufe, von der an solch ein System »zum Leben erwacht«, völlig willkürlich. Die Frage »Was ist Leben?« ist damit letztlich eine semantische. Die Natur birgt eine große Vielfalt komplexer chemischer Systeme. Zunehmend gelingt es Wissenschaftlern, dergleichen auch im Labor herzustellen. Doch wie merkwürdig oder neuartig sich solche Systeme auch verhalten mögen, keines ließe sich eindeutig kennzeichnen als entweder »belebt« oder »unbelebt«.

Die Philosophin Carol Cleland von der Universität von Colorado in Boulder und der Planetenforscher Christopher Chyba von der Universität Princeton (New Jersey) verglichen die aktuellen Versuche einer Definition des Lebens mit den fruchtlosen Bestrebungen im 18. Jahrhundert, Wasser zu charakterisieren. Vor der Entdeckung von Molekülen und vor der Atomtheorie war Wasser nur mit einer Auflis-

Menschen reduzieren komplexe Situationen gern auf ein viel zu einfaches Gegensatzpaar

AG. FOCUS / SPL, STEVE GSCHMEISSNER

Unwirklich erscheint auch diese einzellige Kieselalge, ebenfalls ein Planktonorganismus. Vorstufen von Leben könnten noch bizarrer anmuten.

Robert Hazen hat die Clarence-Robinson-Professur für Erdwissenschaft an der George-Mason-Universität in Fairfax (Virginia) inne. Er ist auch Wissenschaftler am geophysikalischen Labor der Carnegie Institution in Washington D.C.

© New Scientist

Genesis: the scientific quest for life's origins. Von Robert Hazen. Henry Joseph Press, 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/903048.

▷ tung von nicht ausschließlichen, ihm allein zukommenden Merkmalen beschreibbar. Wasser ist klar und flüssig, viele Öle aber auch – außerdem ist schmutziges Wasser nicht klar. Wasser unterhält Leben, viele Nährstoffe jedoch auch – aber verseuchtes Wasser kann tödlich sein, selbst wenn man die Keime nicht einmal sieht. Es gefriert bei Kälte, dringt in Holz ein, fließt abwärts, et cetera, et cetera. Keine dieser Eigenschaften ist zur Definition notwendig und hinreichend. Im 18. Jahrhundert ließ sich die wahre Natur von Wasser schlicht noch nicht fassen – weil man noch nicht verstand, dass es aus besonderen Molekülen besteht, die sich aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom zusammensetzen.

Analog bewerten Cleland und Chyba unseren Kenntnisstand von Leben. Sie meinen, im frühen 21. Jahrhundert seien Wissenschaftler noch gar nicht in der Lage, es zu definieren. Es sei daher besser, aufgeschlossen zu bleiben und sämtliches Vorgefundene einfach nur genau zu beschreiben. Sollte Leben tatsächlich in mehreren Schritten entstanden sein, würde jede Stufe vielleicht ein eigenes taxonomisches Stadium von maßgeblicher Bedeutung darstellen. Jedes Stadium verdiente dann auch eine gesonderte Bezeichnung.

Wie nun kommen wir einer Definition des Lebens näher? Um die Stadien von unbelebter zu belebter Natur bestimmen zu können, brauchen wir letztlich beides zusammen: Experimente mit geeigneten chemischen Systemen unter plausiblen geochemischen Umweltbedingungen, und damit verbunden die gezielte Erforschung unserer Nachbarplaneten. Das Konzept des Auftritts neuartiger Stufen erleichtert die Arbeit im Labor. Denn damit lässt sich das unermesslich komplexe historische Geschehen im Experiment auf eine überschaubarere Abfolge von Schritten reduzieren: wie das Erscheinen von Stoffwechsel, von genetischen (informationstragenden) Polymeren oder von selbstreplizierenden molekularen Systemen. Jede Stufe lohnt sich experimentell zu erforschen und für jede kann man theoretische Modelle entwickeln.

Die unschärfere Umschreibung liefert auch bei der Suche nach außerirdischem Leben Anhaltspunkte. So ist nicht unwahrscheinlich, dass auf dem Mars, dem Jupitermond Europa oder anderen Himmelskörpern unseres Sonnensystems nicht alle, sondern lediglich einige Stufen des Weges zum zellulären Leben auftraten. Sofern es sich wirklich so verhält, wäre dies für die Astrobiologen der Nasa eine entscheidende Information. Angenommen, jedes Stadium am Ursprung des Lebens hinterließ typische, identifizierbare Signaturen – etwa charakteristische Spuren von Molekülen, Isotopen oder von markanten Strukturen: In dem Fall könnten Weltraummissionen nach ihnen gezielt fahnden. Vielleicht verschlingen Zellen – als fortschrittlicheres Stadium – ja tatsächlich sämtliche primitiveren präbiotischen Formen. Vielleicht konnten die primitiveren Erscheinungen, zumindest »fossil«, nur dort überdauern, wo niemals ein zelluläres Leben auftrat. Solche präbiotischen Phänomene könnten dann als extraterrestrische »Abiomarker« dienen – nämlich als Beweis, dass die molekulare Evolution an jenem Ort über präzelluläre Stadien nicht hinauskam. Solche Befunde würden den Forschern erlauben, die außerirdischen Gebiete danach einzuteilen, bis zu welchem präbiotischen Stadium die Entwicklung jeweils gelangte.

Spuren von Protoleben auf Titan?

Der umwölkte Saturnmond Titan bildet in dieser Hinsicht ein reizvolles Studienobjekt (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/2007, S. 32). Er besitzt eine methanreiche Atmosphäre, eineinhalbmal dicker als die der Erde. Organische Moleküle, die ihr die neblig-orangerote Färbung verleihen, regnen auf seine Oberfläche herab und bilden dort eine dicke Schicht aus organischem Schlamm. Seen aus Methan und Ethan existieren auf diesem Mond neben steinhart gefrorenem Wassereis. Für flüssiges Wasser ist es dort normalerweise viel zu kalt, ebenso für eine nennenswerte molekulare Entwicklung in Richtung auf Lebensformen oder Vorstufen davon.

Doch es könnte sein, dass auf dem Titan von Zeit zu Zeit ein großer Komet oder Asteroid einschlug und nun einige Seen auftauten, die erst langsam von der Oberfläche her wieder erstarrten. Tief unter der Eisdecke blieb in manchen Phasen vielleicht über Jahrhunderte oder gar Jahrtausende Zeit dafür, dass sich erste Schritte auf dem Weg zum Leben vollzogen. Auf der Erde mögen entsprechende Spuren vertilgt sein – auf dem tiefgefrorenen Titan könnten sie sich erhalten haben.

Die Frage »Was ist Leben?« setzt besondere wissenschaftliche Maßstäbe. Zumindest so viel begreifen wir schon: Jede starre Zweiteilung in belebte und unbelebte Natur wäre allzu simpel. Vielmehr erschien Leben nach heutigem Verständnis allmählich und stufenweise. Der Prozess fing mit relativ einfachen geochemischen Abläufen an, entwickelte sich aber schließlich hin zu biologischer Komplexität. Die Zwischenschritte würden wir gern im Labor nachvollziehen. Vielleicht haben wir sogar das Glück, manche Stadien eines Tages auf anderen Himmelskörpern eingefroren aufzuspüren. Dann würden wir endlich wissen, wonach wir suchen. ◁

AUF DEN NÄCHSTEN SEITEN FOLGT EIN SONDERTEIL DER RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM ▷

1957

Herzmassage mit Luftdruck

»Die Wiederbelebung der Herztätigkeit durch direkte Herzmassage … setzt große Erfahrungen voraus und ist außerdem für den Operateur recht ermüdend. Parola und Bencini arbeiteten deswegen ein Verfahren aus, das sich instrumenteller Hilfe bedient. Dabei wird eine Spezialkanüle luftdicht in den Herzbeutel eingeführt. Durch diese Kanüle wird unter manometrischer Kontrolle Luft oder Sauerstoff rhythmisch pulsierend in den Herzbeutel eingepreßt.« *Umschau, Jg. 1957, Nr. 19, S. 602, Oktober 1957*

Geschlechtsbestimmung bei Hautfetzen

»Die Gerichtsmedizin ist bemüht, selbst unscheinbarste Spuren zu identifizieren. Wenn beispielsweise die Frage geklärt werden soll, ob das bei einem Verbrecher gefundene Messer zur Verletzung eines männlichen oder weiblichen Körpers benutzt worden ist, dann genügen heute zur Aufklärung schon einige daran befindliche Hautfetzen. Es hat sich nämlich herausgestellt, daß jeder weibliche Zellkern ein feines Fibrillennetzwerk enthält, das als sogenanntes »Sex-Chromatin« (Anm. d. Red.: Barr-Körperchen) nicht nur bei lebenden Wesen, sondern auch noch bis zu vier Wochen nach dem Tode eines Organismus durch Anfärben leicht nachgewiesen werden kann.« *Orion, Jg. 12, Nr. 10, S. 809, Oktober 1957*

Friedliches Geschoss

»Ein friedliches Geschoß wurde in Polen entwickelt. Ohne Aushubarbeiten kann man damit zum Beispiel Kabel unter Bahnkörpern oder bei Schiffsbergungen von Hebeschiff zu Hebeschiff ein Seil unter dem Wrack durchschießen.« *Hobby, Jg. 5, S. 62, Oktober 1957*

Aushubarbeiter mit Projektil nach vollbrachter Leistung

Radium gegen Feuermale

»Es ist der Medizin bisher nicht gelungen, die häßlichen Feuermale, die besonders im Gesicht sehr lästig sind, vollständig zu beseitigen, denn die Heilungen, die mit der Quecksilberlampe erzielt worden sind, waren fast alle unvollständig. Jetzt soll es zwei französischen Forschern gelungen sein … Man überzieht das Feuermal mit einer Schicht, die eine gewisse Menge Radium enthält, je nach der Stärke der Färbung mehr oder weniger. … Nach kurzer Einwirkung des Radiums wird die erkrankte Haut weich, glatt, farblos und nimmt schließlich den Zustand der gesunden Haut an. Ein Vorzug des Verfahrens ist der, daß es völlig schmerzlos ist und gar keine schädlichen Nebenwirkungen haben soll, so daß man also große Flächen auf einmal behandeln kann.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 190, S. 127, 25. Oktober 1907*

Frettchen als Drahtzieher

»Nach einer Mitteilung … ist es der Central Union Telephone Company … gelungen, einen ebenso eigenartigen wie einfachen und billigen Ersatz für menschliche Arbeitskraft zu finden. Die genannte Gesellschaft bedient sich nämlich zum Einziehen der Seile in die Kabelröhren der Frettchen. … Dem Frettchen wird eine Art von Geschirr angelegt, an welchem das eine Ende des durchzuziehenden Seiles befestigt wird … , während man an den Ausgang etwas frisches Fleisch als Lockmittel legt. Das Frettchen … stürzt mit großer Schnelligkeit darauf zu.« *Himmel und Erde, 19. Jg., Nr. 10, S. 473, Oktober 1907*

1907

Panorama-Spiegel

»Der Panorama-Spiegel zeigt die einfachste Ansichtskarte sowie Bilder aller Art in lebenswahrer, plastischer Vollendung; er vergrössert alle Bilder ganz wesentlich und raubt ihnen das unnatürliche, tote Aussehen, indem er jedem Bilde eine effektvolle Plastik verleiht. Beim Beschauen eines derartig stark vergrösserten … Bildes fühlt man sich unwillkürlich in die beschaute Landschaft versetzt. … Amateur-Photographen werden den neuen Artikel mit ganz besonderer Freude begrüssen, da ihnen der Panorama-Spiegel die Fehlaufnahmen resp. etwas unscharfe Photographien wunderbar scharf und stark vergrössert … wiedergibt.« *Rundschau für Optiker, Jg. 28, Nr. 20, S. 294, 15. Oktober 1907*

Der aufgeklappte Panorama-Spiegel mit eingeklemmter Postkarte

VON LINKS NACH RECHTS: 1. AP PHOTO, JOHN MC CONNICO; 2. ISTOCKPHOTO, JAAP HART; 3. ISTOCKPHOTO; 4. ISTOCKPHOTO, MALCOLM ROMAIN; 5. ISTOCKPHOTO, TONY TREMBLAY; 6. ISTOCKPHOTO, ROB HILL

Die Wissenschaft hinter dem KLIMAWANDEL

Warum sind sich Klimatologen so sicher, dass die Erde sich durch menschliche Aktivitäten bedrohlich aufheizt? Hier fassen Autoren des jüngsten UN-Klimaberichts die Argumente zusammen und diskutieren verbleibende Unsicherheiten.

Von William Collins, Robert Colman, James Haywood, Martin R. Manning und Philip Mote

Für Wissenschaftler, die den Klimawandel erforschen, sind »Heureka«-Erlebnisse selten. Im Allgemeinen wachsen ihre Erkenntnisse langsam und stetig. Akribisch fügen sie die Mosaiksteinchen jeder neuen Temperaturmessung, jeder Satellitenerkundung und jeder Simulation zusammen. Die Daten werden geprüft und gegengecheckt, Ideen immer wieder in Frage gestellt. Passen die Beobachtungen zu den vorhergesagten Veränderungen? Könnte es nicht eine alternative Erklärung geben? Gute Klimaforscher wollen – wie alle guten Forscher – sicherstellen, dass ihre Ergebnisse den höchsten Gütestandards genügen.

Auf diese unspektakuläre Weise haben sich mit den länger werdenden Messreihen, unserem zunehmenden Verständnis des Klimasystems und der Verfeinerung der Computermodelle die Indizien für die globale Erwärmung Stück für Stück vermehrt. Zugleich sind im Lauf der vergangenen zwanzig Jahre die Belege für die Schuld des Menschen an der Entwicklung unerbittlich gewachsen. In der wissenschaftlichen Gemeinschaft hat sich die Überzeugung, dass tatsächlich ein Klimawandel stattfindet und er noch viel größere Ausmaße annehmen kann, inzwischen bis fast zur Gewissheit verdichtet. Das spiegelt sich unmissverständlich im neuesten »Assessment Report« des Zwischenstaatlichen Rats für Klimafragen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) wider, dem vierten einer Reihe von Sachstandsberichten zum Thema, die Hunderte von Wissenschaftlern weltweit geschrieben und begutachtet haben.

Im Februar veröffentlichte das Gremium eine kondensierte Version des ersten Teils über die wissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels. Diese »Zusammenfassung für Entscheidungsträger« enthielt für Politiker wie Normalbürger eine klare Botschaft. Demnach beträgt die Wahrscheinlichkeit inzwischen mehr als neunzig Prozent, dass die Menschheit in das Klima eingegriffen hat und dass weitere vom Menschen verursachte Änderungen bevorstehen. Manche davon sind laut Bericht nicht mehr vermeidbar; dennoch liegt die Zukunft, vor allem auf lange Sicht, noch weit gehend in unserer Hand: Wie stark der Klimawandel am Ende ausfällt, hängt davon ab, was die Menschen gegen die Treibhausgasemissionen unternehmen.

Der erste Teil des IPCC-Reports konzentriert sich auf vier Themen: die Triebfedern des Klimawandels, die beobachtbaren Veränderungen im Klimasystem, das Verständnis von Ursache-Wirkungs-Beziehungen und Projektionen künftiger Veränderungen. Seit dem vorletzten IPCC-Bericht von 2001 gab es in all diesen Bereichen wichtige Fortschritte. Auf den folgenden Seiten präsentieren wir die Schlüsselbefunde, die das Ausmaß des Wandels dokumentieren und zu dem unvermeidlichen Schluss führen, dass menschliche Aktivitäten die Ursache sind.

Die Triebfedern des Klimawandels

Bestimmte Spurengase in der Atmosphäre – vor allem Kohlendioxid, Methan, Distickstoffmonoxid und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) – fangen mittels des wohlbekannten Treibhauseffekts thermische Energie, also Wärme in der Atmosphäre ein. Die Konzentrationen von Kohlendioxid, Methan und Distickstoffoxid in der Lufthülle waren ungefähr 10 000 Jahre lang stabil geblieben, bevor sie in den vergangenen 200 Jahren plötzlich immer schneller anstiegen (siehe Kasten auf S. 75). In den letzten zehn Jahren hat der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre stärker zugenommen als in jeder Zehnjahresperiode davor, seit die kontinuierliche Überwachung des Gases in den 1950er Jahren begann. Heute liegt seine Konzentration etwa 35 Prozent über dem vorindustriellen Niveau, das aus Luftblasen bestimmt werden kann, die in Eisproben aus Grönland oder der Antarktis eingeschlossen sind. Der Methangehalt der Luft ist zweieinhalbmal so hoch wie in vorindustriellen Zeiten, und der Anteil an Distickstoffmonoxid liegt zwanzig Prozent höher.

Wie können wir sicher sein, dass die Menschheit diese Zuwächse verursacht hat? Einige Treibhausgase wie die Fluorchlorkohlenwasserstoffe haben gar keine natürlichen Quellen. Bei den anderen beweisen zwei entscheidende Beobachtungen den menschlichen Einfluss. Zum einen zeigen geografische Unterschiede in den Konzentrationen, dass sich die Quellen vorwiegend auf Landgebieten der dichter besiedelten Nordhalbkugel befinden. Zum anderen belegt die Isotopenanalyse, mit der man die Emissionsquellen unterscheiden

In Kürze

- Die **Experten** sind überzeugt davon, dass ein Klimawandel stattfindet und dass er sich noch verstärken wird.
- Gemäß dem jüngsten Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geht die beobachtbare **globale Erwärmung** mit mehr als neunzigprozentiger Wahrscheinlichkeit auf den Menschen zurück.
- Hauptursache ist der **Ausstoß von Treibhausgasen** auf Grund menschlicher Aktivitäten, vor allem der Verfeuerung fossiler Brennstoffe.
- Weitere Veränderungen des Weltklimas sind nicht mehr zu vermeiden. Dennoch bleiben vor allem auf längere Sicht **Gestaltungsspielräume**: Das Ausmaß der globalen Erwärmung hängt davon ab, inwieweit die Menschheit die Treibhausgasemissionen einschränkt.

Wichtige Begriffe

- Der **Strahlungsantrieb** eines klimawirksamen Faktors bezeichnet seine Fähigkeit, die Energiebilanz der Erde zu ändern.
- Bedeutende **Treibhausgase** sind etwa Kohlendioxid, Methan und Fluorchlorkohlenwasserstoffe.
- **Ozon** ist in Bodennähe ein Schadstoff, doch schützt die Ozonschicht in der Stratosphäre das irdische Leben vor UV-Strahlung.
- Unter **Albedo** versteht man die Reflektivität einer Oberflächenregion. Sie nimmt mit der Helligkeit zu.
- **Aerosole** sind Schwebeteilchen in der Luft. Sie entstehen etwa bei Waldbränden oder auch beim Verfeuern fossiler Brennstoffe.
- **Kondensstreifen** sind künstliche Wolken, die aus den Abgasen von Flugzeugen entstehen. Auch sie können das Klima beeinflussen.
- Die **Troposphäre** ist die unterste, rund zwölf Kilometer dicke Schicht der Atmosphäre.
- Die **Stratosphäre** schließt sich an die Troposphäre an und reicht bis in eine Höhe von fünfzig Kilometern.

kann, dass der Hauptteil der Kohlendioxidzunahme von der Verfeuerung fossiler Brennstoffe herrührt. Methan und Distickstoffmonoxid reichern sich sowohl durch landwirtschaftliche Praktiken als auch durch die Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas in der Atmosphäre an.

Um die Wirkung der erhöhten Treibhausgaskonzentrationen zu quantifizieren, verwenden Klimaforscher das Konzept des Strahlungsantriebs *(radiative forcing)*. Darunter verstehen sie den Beitrag eines klimawirksamen Faktors zur globalen Strahlungsbilanz, normalerweise ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter und bezogen auf vorindustrielle Zeiten. Ein positiver Wert führt zu einer Erwärmung; ein negativer zu einer Abkühlung. Welcher Strahlungsantrieb von den langlebigen Treibhausgasen ausgeht, lässt sich ziemlich genau bestimmen, weil die atmosphärischen Konzentrationen und die räumliche Verteilung dieser Gase sowie die physikalischen Grundlagen ihrer Wechselwirkung mit elektromagnetischer Strahlung bekannt sind.

Der Klimawandel wird allerdings nicht allein durch erhöhte Konzentrationen an Treibhausgasen verursacht; auch andere Vorgänge – sowohl natürliche wie vom Menschen veranlasste – spielen eine Rolle. Zu den natürlichen Antrieben gehören Veränderungen in der Sonnenaktivität und starke Vulkanausbrüche. Auf das Konto des Menschen gehen dagegen die Emission mikroskopischer Schwebeteilchen, die Aerosole genannt werden (oder ihrer Vorläufermoleküle), und die Kondensstreifen von Flugzeugen – ferner Änderungen im Ozongehalt der Stratosphäre und Troposphäre sowie in der Oberflächenalbedo (Reflektivität). Doch der Einfluss all dieser Faktoren ist sehr viel weniger exakt bekannt als derjenige der Treibhausgase (Kasten rechts).

Am unsichersten sind sich die Forscher darüber, welche Rolle der so genannte Aerosol-Wolken-Albedo-Effekt spielt. Dabei wechselwirken Aerosole menschlichen Ursprungs auf komplizierte Weise mit Wolken, sodass diese heller werden und mehr Sonnenlicht ins All zurückwerfen. Unklarheiten bestehen auch bei der direkten Auswirkung der anthropogenen Aerosole: Wie viel Sonnenlicht reflektieren oder verschlucken die festen oder tröpfchenartigen Partikel?

Zusammengenommen könnten die Aerosoleffekte eine Abkühlung verursachen, welche die Erwärmung durch die langlebigen Treibhausgase bis zu einem gewissen Grad ausgleicht. Aber um wie viel? Würde die Erwärmung vielleicht sogar mehr als wettgemacht? Es gehört zu den Fortschritten seit dem IPCC-Report von 2001, dass sich die Unsicherheiten bei den einzelnen Antriebsmechanismen durch eine Kombination zahlreicher Modellstudien und Beobachtungen quantifizieren und eingrenzen ließen. Dadurch können wir den Beitrag der Menschheit heute sehr zuverlässig abschätzen. Er ist demnach zehnmal so groß wie der natürliche Strahlungsantrieb durch Veränderungen der Sonnenaktivität.

Dieses Ergebnis passt gut zu den beobachteten Anzeichen einer Erderwärmung, die wir im Folgenden diskutieren. Das Zusammenspiel der verschiedenen Antriebe kann man sich als ein Tauziehen vorstellen. Positive und negative Komponenten versuchen die Erde in einen wärmeren beziehungsweise kühleren Zustand zu zerren. Die Stärke der widerstreitenden Beiträge kennen wir heute besser als je zuvor. Demnach wird unser Planet zu einem wärmeren Klima hingezogen – und das in wachsendem Maß; denn der Strahlungsantrieb durch den Treibhauseffekt nimmt stetig zu.

Beobachtete Klimaänderungen

Anhand der vielen neuen oder verbesserten Sätze von Beobachtungsdaten, die bei der Erstellung des IPCC-Reports von 2007 vorlagen, ließen sich die Veränderungen umfassender einschätzen als bei den früheren Berichten. Den Messreihen zufolge waren elf der zwölf vergangenen Jahre die wärmsten seit Beginn der Aufzeichnungen um die Mitte des 19. Jahrhunderts. Die Wahrscheinlichkeit, dass so viele Rekordjahre rein zufällig aufeinander folgen, ist extrem gering.

Veränderungen in drei wichtigen Messgrößen – der globalen Mitteltemperatur, der Höhe des Meeresspiegels und der Schneebedeckung auf der Nordhalbkugel (siehe Kasten S. 76) – deuten übereinstimmend auf eine Erwärmung hin, wenngleich es Unterschiede im Detail gibt. Im vorhergehenden IPCC-Bericht war von einer Zunahme der globalen Durchschnittstemperatur um 0,6 ± 0,2 Grad Celsius in der Periode zwischen 1901 und 2000 die Rede. Auf Grund der starken Erwärmung in jüngster Zeit lautet der aktualisierte Wert von 1906 bis 2005 nun 0,74 ± 0,18 Grad Celsius.

Beachten Sie, dass davon allein 0,65 ± 0,15 Grad auf die zweite Hälfte, also die Zeit zwischen 1956 und 2005 entfallen. Der Großteil

der Erwärmung im 20. Jahrhundert hat also in den vergangenen fünfzig Jahren stattgefunden.

Das Klima schwankt selbstverständlich weiterhin um die erhöhten Mittelwerte. Entsprechend haben sich die Extreme verändert: Kalte oder frostige Tage und Nächte sind seltener geworden, Hitzewellen dagegen häufiger.

Das Klima wird aber nicht nur durch vertraute Größen wie die Durchschnittswerte von Temperatur, Niederschlag und so weiter bestimmt. Eine wichtige Rolle spielt auch der Zustand des Ozeans und der Kryosphäre, zu der das Eis auf dem Meer sowie auf Seen und Flüssen, die großen Eisschilde auf Grönland und der Antarktis, Gletscher, Schnee und gefrorener Boden gehören. Die komplizierten Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Teilen des Klimasystems haben einen wesentlichen Einfluss auf den Klimawandel. So strahlt eine geschrumpfte Meereisdecke weniger Sonnenlicht direkt ins All zurück. Außerdem erhöht sich der Wärmefluss zwischen Ozean und Atmosphäre, was wiederum die Bewölkung und den Niederschlag beeinflussen kann.

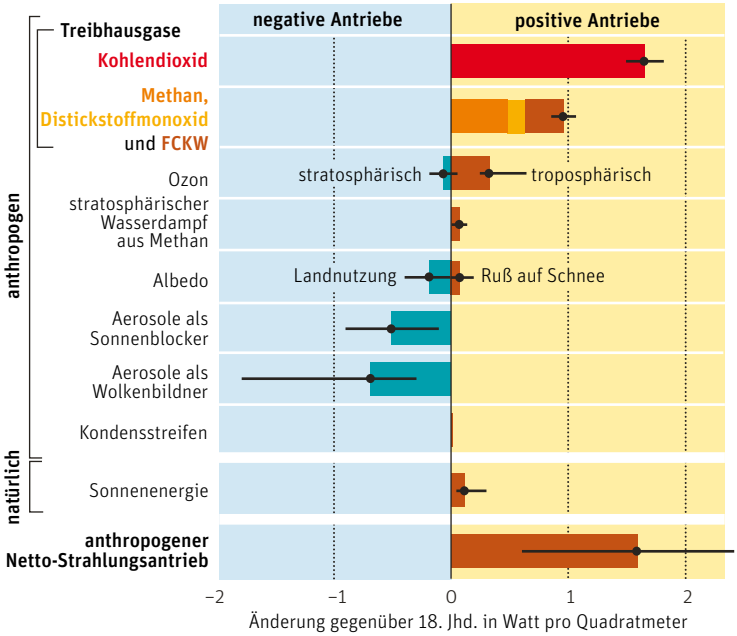
Viele weitere Beobachtungen stehen mit der beobachteten Erwärmung in Einklang und spiegeln einen Wärmefluss von der Atmosphäre in andere Komponenten des Klimasystems wider. Die Schneebedeckung im Früh-

Der Anteil von Kohlendioxid in der Atmosphäre ist gegenüber dem vorindustriellen Niveau um 35 Prozent gestiegen

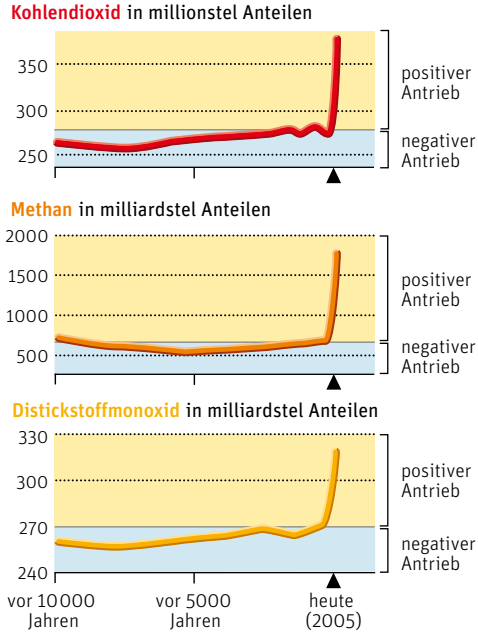
Strahlung und Treibhausgase in der Erdatmosphäre

Beim Tauziehen zwischen positiven und negativen Strahlungsantrieben – Erstere erwärmen die Erde, Letztere kühlen sie ab – sind die primär vom Menschen verursachten Faktoren, die zu höheren Temperaturen führen, klar in der Übermacht (Grafik links). Den wichtigsten anthropogenen Antrieb bilden bestimmte, relativ langlebige Treibhausgase in der Atmosphäre. Ihre Konzentrationen sind in den vergangenen 200 Jahren rapide gestiegen (Grafik rechts).

Strahlungsantriebe im Überblick



Treibhausgase im Steigflug



Die Tabelle enthält die geschätzten mittleren globalen Strahlungsantriebe der wichtigsten klimawirksamen Faktoren im Jahr 2005 relativ zur vorindustriellen Zeit. Die schwarzen Fehlerbalken zeigen den Grad der Unsicherheit bei einzelnen Antriebsmechanismen an: Die Wahrscheinlichkeit, dass die Werte innerhalb dieser Balken liegen, beträgt neunzig Prozent. Zum Beispiel ist der Strahlungsantrieb durch die Treibhausgase ziemlich genau bekannt. Anders verhält es sich bei den Aerosoleffekten. Vulkanische Aerosole wurden weggelassen, weil sie nur gelegentlich auftreten.

Die Gehalte der Atmosphäre an Kohlendioxid, Methan und Distickstoffoxid in der Vergangenheit wurden aus Gasbläschen in Eisbohrkernen bestimmt. Der direkt gemessene Anstieg in den letzten Jahrzehnten lässt sich auf menschliche Aktivitäten zurückführen. Die Antriebe beziehen sich wieder auf die Zeit unmittelbar vor Beginn des Industriezeitalters.

GRAFIKEN: DANIELA NAOMI MOLNAR; FOTOS VON LINKS NACH RECHTS: 1. ISTOCKPHOTO; 2. ISTOCKPHOTO, MIGUEL ANGELO SILVA; 3. CORBIS, DLILLC; 4. EMILY HARRISON; 5. ISTOCKPHOTO, DAVID WOODS; 6. ISTOCKPHOTO, BEN CONLAN; 7. CORBIS-BETTMANN; 8. ISTOCKPHOTO, ANNA PUSTOVAYA; 9. NOAA; 10. ISTOCKPHOTO; 11. ISTOCKPHOTO, HEIKO BENNEWITZ

Die arktische Meereisdecke ist beträchtlich geschrumpft

arktisches Meereis 1979

arktisches Meereis 2005

BEIDE: NASA, GSFC VISUALIZATION STUDIO

jahr, die bei steigenden Frühlingstemperaturen in den nördlichen mittleren Breiten abnimmt, hat sich um das Jahr 1988 abrupt verringert und ist seitdem auf dem niedrigen Niveau von damals geblieben. Dieser Rückgang gibt Anlass zur Sorge; denn die Schneedecke hat in vielen Regionen große Bedeutung für die Bodenfeuchte und die Wasservorräte.

Im Meer zeigen sich deutliche Erwärmungstrends, die sich erwartungsgemäß mit der Tiefe abschwächen. Sie weisen darauf hin, dass der Ozean mehr als achtzig Prozent der zusätzlich ins Klimasystem gepumpten Energie aufgenommen hat. Diese Erwärmung ist der Hauptgrund für den beobachtbaren Anstieg des Meeresspiegels; denn Wasser dehnt sich mit zunehmender Temperatur aus. Hinzu kommt das Schmelzwasser von zurückweichenden Gletschern und sich ausdünnenden Eisschilden.

Dank Satellitenmessungen seit 1993 lässt sich der globale Anstieg des Meeresspiegels inzwischen sehr genau angeben. Demnach betrug er im Zeitraum von 1993 bis 2003 jährlich 3,1 ± 0,7 Millimeter. Die Werte für einige frühere Dekaden liegen allerdings ähnlich hoch. Deshalb sind längere Satellitenbeobachtungen nötig, ehe eindeutig feststeht, ob sich der Anstieg des Meeresspiegels beschleunigt.

Seit 1978 ist auch die Ausdehnung des arktischen Meereises drastisch zurückgegangen: im Jahresmittel um 2,7 ± 0,6 und im Sommer sogar um 7,4 ± 2,4 Prozent pro Jahrzehnt. Desgleichen wurde weltweit ein Rückzug der Gletscher sowie ein Schrumpfen der Eisschilde in Grönland und der Antarktis beobachtet. Parallel dazu haben sich die Permafrostböden erwärmt. Leider sind viele dieser Größen erst neuerdings gut dokumentiert, weshalb die Länge der verschiedenen Messreihen schwankt.

Die hydrologischen Veränderungen stehen ebenfalls im Großen und Ganzen mit der Erwärmung in Einklang. Das stärkste Treibhausgas ist Wasserdampf; anders als bei Kohlendioxid, Methan oder Distickstoffmonoxid hängt seine Konzentration in der Luft im Wesentlichen von der Temperatur ab. Diese Konzentration, also die Luftfeuchte, hat im globalen zeitlichen Mittel spätestens seit den 1980er Jahren zugenommen.

Temperaturhoch im Mittelalter

Auch die Niederschläge sind ungeachtet starker lokaler Schwankungen in mehreren großen Weltregionen ergiebiger geworden – unter anderem im östlichen Nord- und Südamerika, in Nordeuropa sowie in Nord- und Zentralasien. Im Sahelgebiet, im Mittelmeerraum, im südlichen Afrika und in Teilen Südasiens zeigt sich dagegen ein Trend zu mehr Trockenheit.

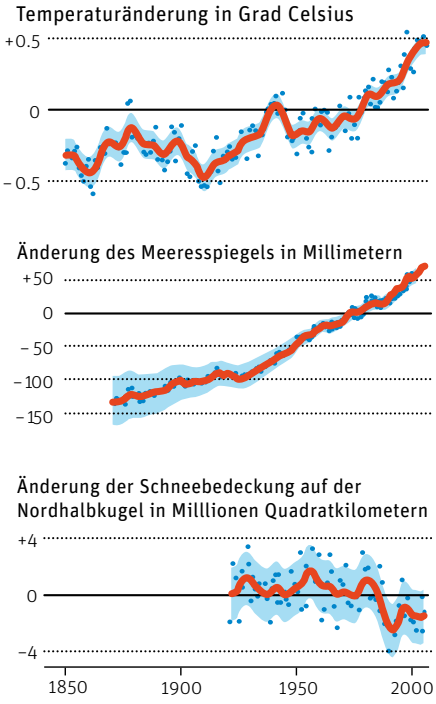
Der Salzgehalt des Oberflächenwassers im Meer kann als riesiges Messgerät für die Regenmenge dienen. Er hat sich in den mittleren und hohen Breiten generell verringert, in niedrigen Breiten dagegen erhöht. Das stimmt mit den Veränderungen der großräumigen Niederschlagsmuster überein.

Rekonstruktionen des früheren Klimas anhand von Baumringen und anderen Indikatoren (»Proxies«) zeigen, welche Schwankungen natürlicherweise auftreten. Demnach bewegt sich die globale Mitteltemperatur der vergangenen fünfzig Jahre auf einem Niveau, das die Höchstwerte seit mindestens 1300 Jahren übersteigt. Die wärmste Periode zwischen 700 und 1950 war vermutlich der Zeitraum von 950 bis 1100. Damals lag die globale Mitteltemperatur mehrere Zehntelgrade unter der seit 1980 gemessenen.

Nach dem bisher Gesagten gibt es also überwältigende Indizien dafür, dass menschliche Aktivitäten einen positiven Strahlungsantrieb verursacht haben und dass ein Klimawandel stattfindet. Aber hängt beides zusammen? Beruhen die beobachteten Änderungen

Zeichen des Klimawandels

Messungen der globalen Mitteltemperatur am Boden sowie der durchschnittlichen Meeresspiegelhöhe und der Schneebedeckung auf der Nordhalbkugel im März und April dokumentieren die zunehmende Erwärmung der Erde. Die Jahresmittelwerte sind durch blaue Punkte wiedergegeben. Die roten Linien zeigen den Temperaturverlauf in geglätteter Form, während die blaue Schattierung die Unsicherheitsspanne angibt.



GRAFIKEN DIESER DOPPELSEITE: LUCY READING-IKKANDA; FOTOS VON LINKS NACH RECHTS: 1. ISTOCKPHOTO, STEPHEN STRATHDEE; 2. ISTOCKPHOTO; 3. PHOTO RESEARCHERS INC, MARTIN BOND; 4. CORBIS-BETTMANN; 5. ISTOCKPHOTO, NICK TZOLOV; 6. ISTOCKPHOTO, JEREMY EDWARDS; 7. ISTOCKPHOTO; 8. ISTOCKPHOTO, HASAN KURSAD ERGAN; 9. AURORA PHOTOS, IPN, JIM REED; 10. CORBIS-BETTMANN; 11. ISTOCKPHOTO, RICK RHAY

des Klimas hauptsächlich auf anthropogenen Emissionen oder sind sie möglicherweise das Resultat anderer Faktoren – etwa eines natürlichen Antriebs oder einfach spontaner Variabilität im Klimasystem?

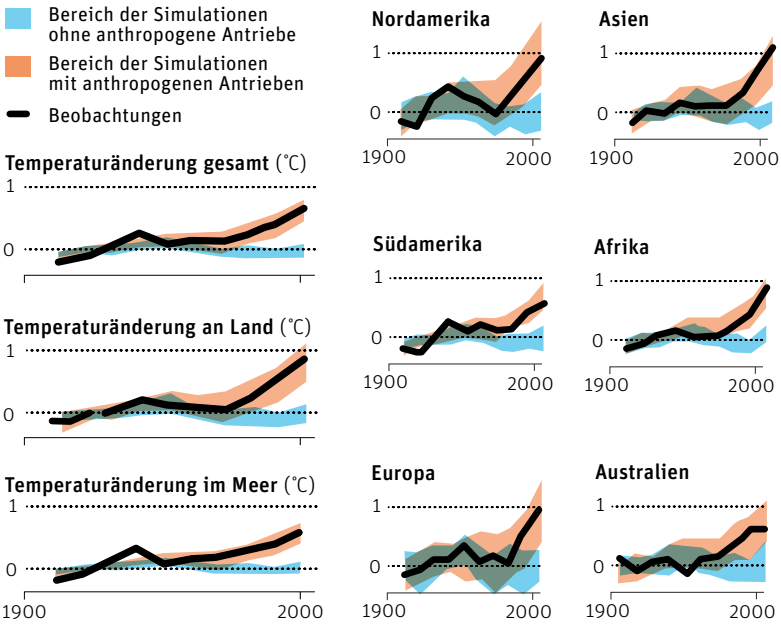
Der IPCC-Report von 2001 nannte es »wahrscheinlich« (mit einer Gewissheit von mindestens 66 Prozent), dass die Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts größtenteils dem Menschen zuzuschreiben ist. Der Report von 2007 hat diese Aussage noch deutlich verschärft. Demnach trägt der Mensch nun »sehr wahrscheinlich« (mit mehr als 90-prozentiger Sicherheit) die Schuld am Klimawandel.

Die zusätzliche Gewissheit speist sich aus mehreren unabhängigen Quellen. Zunächst einmal sind die Messreihen jetzt ungefähr fünf Jahre länger, und die globale Erwärmung in dieser Periode deckt sich weit gehend mit den IPCC-Projektionen eines von Treibhausgasen angetriebenen Temperaturanstiegs, wie sie in früheren Reports seit 1990 standen. Außerdem wurden diesmal Veränderungen in weiteren

Elf der letzten zwölf Jahre waren die wärmsten seit dem Beginn verlässlicher Temperaturmessungen um 1850

Anthropogene Temperaturänderung

Klimasimulationen, die nur natürliche Strahlungsantriebe (blau) einbeziehen, geben den tatsächlichen Temperaturverlauf nicht wieder. Werden jedoch auch vom Menschen verursachte Faktoren (orange) berücksichtigt, reproduzieren die Computermodelle den Anstieg der Temperatur in der realen Welt sowohl im globalen Maßstab als auch auf der Ebene einzelner Kontinente recht genau. Nullpunkt der Temperaturskala ist der Mittelwert zwischen 1901 und 1950.



BR alpha

Neue 16-teilige Reihe:

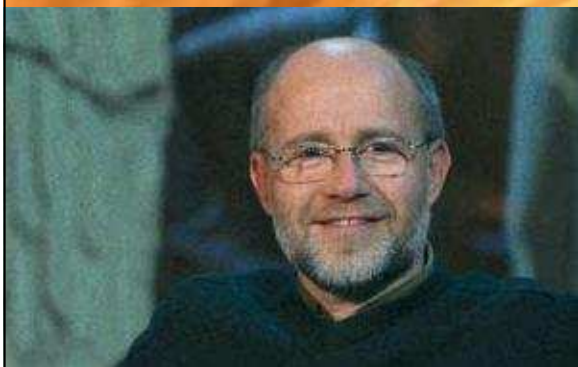
Die 4 Elemente

Aus was besteht eigentlich die Welt? Wird Bayern in 20 Millionen Jahren noch existieren? Woher bekommt die Sonne ihre Energie? Was ist Wasser? Auf diese Fragen gibt der Astrophysiker und Naturphilosoph *Harald Lesch* den Zuschauern Antworten, indem er einen kultur- und naturwissenschaftlichen Bogen von den alten griechischen Philosophen bis zur modernen Lehre der Elementarteilchen und fundamentalen physikalischen Wechselwirkungen schlägt.
Die 16-teilige Sendereihe wurde in bayerischer Bilderbuchlandschaft gedreht.

Ab 10. August 2007, wöchentlich freitags, 22.45 Uhr, in BR-alpha

(Wiederholung: montags, 9.30 Uhr)

www.br-alpha.de



Teilaspekten des Klimas wie der atmosphärischen Zirkulation und der Meerestemperaturen berücksichtigt. Daraus ergibt sich ein konsistentes und erweitertes Bild der menschlichen Einflussnahme. Die Klimamodelle, die den Zusammenhang zwischen Treibhausgasen und Erwärmung untersuchen, sind zudem verbessert worden und können das gegenwärtige Klima und das der jüngsten Vergangenheit inzwischen ziemlich genau reproduzieren. Und schließlich ist es seit dem letzten IPCC-Bericht gelungen, einige bedeutsame Inkonsistenzen in den Messreihen weit gehend aufzulösen.

Die wichtigste Unstimmigkeit bestand in einer scheinbaren Diskrepanz zwischen den Temperaturaufzeichnungen mit Thermometern am Boden, die eine deutliche Erwärmung in den letzten Jahrzehnten belegten, und den atmosphärischen Messdaten von Ballonen und Satelliten, die fast keine Temperaturerhöhung zeigten. Mehrere neue Analysen der Satelliten- und Ballondaten, die systematische Fehler nachwiesen, haben diese Diskrepanz jetzt beseitigt: Sowohl an der Erdoberfläche als auch in der Atmosphäre fand eine Erwärmung statt.

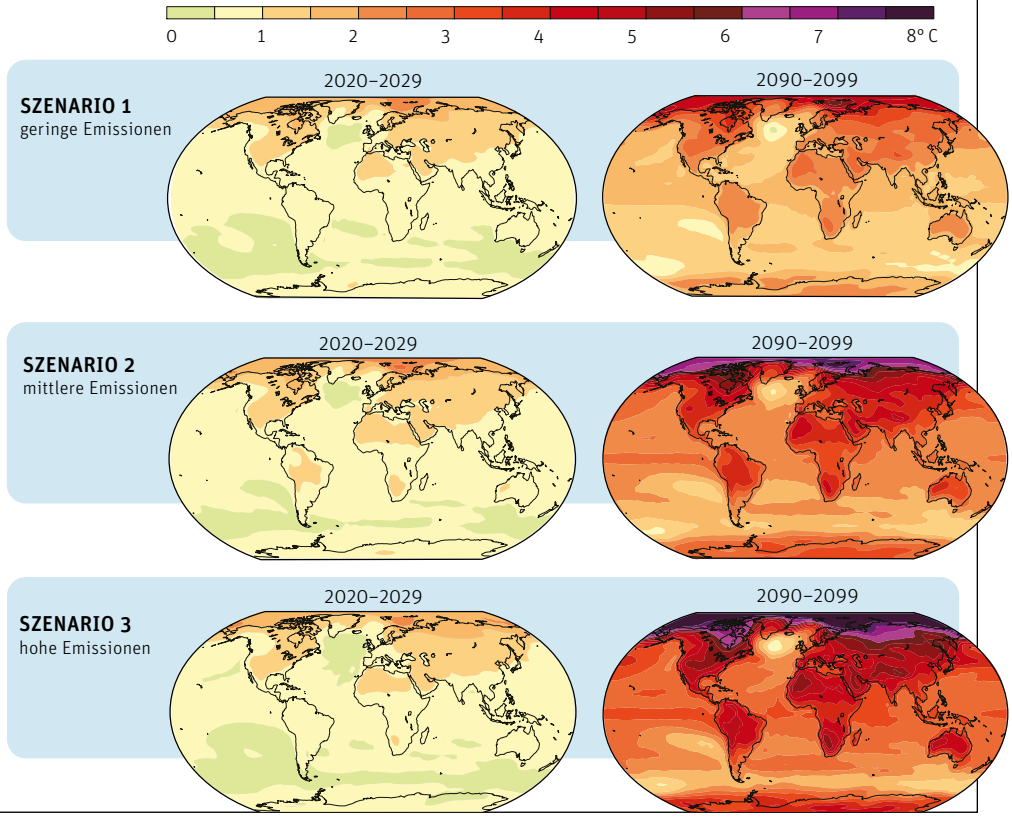
Der ideale Test auf die Ursache des Temperaturanstiegs wäre ein Experiment, das prüft, wie sich das Erdklima im 20. Jahrhundert bei konstanten (statt zunehmenden) Treibhausgaskonzentrationen entwickelt hätte. Solch ein Experiment ist natürlich nicht machbar. Deshalb simulieren Wissenschaftler die Vergangenheit mit Klimamodellen.

Seit dem IPCC-Bericht von 2001 haben zwei bedeutsame Fortschritte das Vertrauen in die Computermodelle erhöht. Der erste ist die Erstellung eines umfassenden Ensembles von Simulationen für die historische und künftige Entwicklung des Klimas durch weltweit 18 unabhängige Forschergruppen. Der Einsatz so vieler verschiedener Modelle hilft besser abzuschätzen, wie stark sich Unsicherheiten bei diversen klimarelevanten Faktoren auf die Ergebnisse der Simulationen auswirken.

Einige Prozesse wie atmosphärische und ozeanische Strömungen oder die Ausbreitung von Sonnenlicht und Wärme sind zwar gut verstanden und durch die physikalischen Gleichungen angemessen repräsentiert. Doch etliche besonders kritische Komponenten des

Modellierte Temperaturänderungen im 21. Jahrhundert

Für drei sozioökonomische Szenarien sind die voraussichtlichen Änderungen der Oberflächentemperatur relativ zum Mittelwert der Jahre 1980 bis 1999 dargestellt. Die Projektionen beruhen auf Berechnungen mit 22 Klimamodellen von 17 unterschiedlichen Computerprogrammen. Alle drei Szenarien stützen sich auf Studien, die vor dem Jahr 2000 gemacht wurden, und beinhalten keine zusätzlichen klimapolitischen Maßnahmen; mit anderen Worten, es sind keine Schadensbegrenzungsszenarien.



KARTEN: DANIELA NAOMI MOLNAR, NACH: IPCC, CLIMATE CHANGE 2007. THE SCIENTIFIC BASIS, SUMMARY FOR POLICYMAKERS;
FOTOS VON LINKS NACH RECHTS: 1. ISTOCKPHOTO; 2. AURORA PHOTOS, TY MILFORD; 3. CORBIS, LINDSAY HEBBERD; 4. CORBIS, BILDERBUCH DESIGN PICS;
5. ISTOCKPHOTO, DANIEL STEIN; 6. ISTOCKPHOTO, OLEG FEDORENKO; 7. AURORA PHOTOS, PETER ESSICK; 8. ISTOCKPHOTO, SHAUN LOWE; 9. ISTOCKPHOTO, BURCU ARAT SUP

Klimasystems wie die Wolken, die Meereswirbel und die Verdunstung durch Pflanzen kennt man sehr viel weniger genau. Sie werden deshalb nur näherungsweise und in vereinfachter Form mittels so genannter Parametrisierungen berücksichtigt. Mit der Entwicklung von Multimodell-Ensembles wollten die Wissenschaftler vor allem herausfinden, wie der Mangel an Genauigkeit auf die Vorhersage des Klimawandels und die möglichen Ursachen durchschlägt. So viele Modellen wie im jüngsten IPCC-Bericht gab es noch nie.

Der zweite Fortschritt ist, dass bestimmte Klimaprozesse in den Modellen detaillierter und realistischer dargestellt wurden. Das gilt vor allem für das Verhalten atmosphärischer Aerosole, die Dynamik (Bewegung) des Meereises sowie den Austausch von Wasser und Energie zwischen Land und Atmosphäre. Heute enthalten mehr Modelle als früher die wichtigsten Aerosoltypen und die Wechselwirkungen zwischen Schwebeteilchen und Wolken.

Wenn Wissenschaftler mit Klimamodellen die Ursache der globalen Erwärmung erforschen, lassen sie zunächst Simulationen laufen, bei denen nur »natürliche« Einflüsse wie Veränderungen der Sonnenaktivität und größere Vulkanausbrüche in den vergangenen hundert Jahren berücksichtigt werden. Im nächsten Durchlauf geht dann auch der vom Menschen verursachte Zuwachs an Treibhausgasen und Aerosolen in die Rechnungen ein.

Die Resultate solcher Doppelsimulationen lassen an Klarheit nichts zu wünschen übrig (siehe Kasten auf S. 77). Modelle, die ausschließlich natürliche Antriebe berücksichtigen, können die beobachtete globale Erwärmung seit der Mitte des 20. Jahrhunderts nicht erklären. Das gelingt nur, wenn zusätzlich anthropogene Faktoren berücksichtigt werden. Auch beim Muster der großräumigen Temperaturänderungen stimmen die Ergebnisse der Simulationen mit den Beobachtungen am besten überein, wenn alle Antriebe im Modell enthalten sind.

Zwei Tatsachen überführen den Menschen als Übeltäter. Die erste ist, dass die Temperaturen über dem Land stärker zugenommen haben als über dem Meer und an der Meeresoberfläche stärker als in tieferen Wasserschichten. Beides passt zum Bild einer von Treibhausgasen aufgeheizten Atmosphäre als Verursacher. Das Meer erwärmt sich wegen seiner großen thermischen Trägheit langsamer. Dabei nimmt es eine riesige Menge Wärme auf – was beweist, dass die Energiebilanz des Planeten nicht mehr ausgeglichen ist. Das zweite stark belastende Indiz besteht darin, dass sich die Troposphäre erwärmt, die Stratosphäre darüber jedoch abkühlt hat. Wären Änderungen der Sonnenintensität der Hauptgrund für die Erwärmung, sollte sie in beiden Atmosphärenschichten gleichermaßen auftreten. Der beobachtete Kontrast entspricht aber genau dem, was zu erwarten ist, wenn durch den gestiegenen Treibhauseffekt mehr Wärme in den unteren Luftschichten verbleibt.

All diese Beobachtungen und Simulationen zusammen liefern nach sorgfältiger Analyse die Basis für die gestiegene Gewissheit, dass der Mensch hinter der globalen Erwärmung steckt. Es gab Theorien, wonach die kosmische Strahlung die Wolkenbildung und damit das Klima beeinflusst. Sie basierten jedoch auf Korrelationen mit begrenzten Messreihen und haben Tests mit zusätzlichen Daten nicht standgehalten. Auch bleiben die physikalischen Mechanismen spekulativ.

Wie sieht es mit kleinskaligeren Mustern aus? Die Ursache des Klimawandels zu bestimmen wird umso schwieriger, je kleiner die betrachteten Regionen und je kürzer die Zeiträume sind. Das liegt daran, dass sich die natürlichen kleinskaligen Temperaturschwankungen weniger »herausmitteln« und das Klimasignal leichter verwischen können. Trotzdem bedeutet die anhaltende Erwärmung, dass das Signal auch bei kleineren Skalen auftaucht. Laut IPCC-Bericht haben die menschlichen Aktivitäten die Temperatur bis hinab zur Größenordnung einzelner Kontinente deutlich beeinflusst – mit Ausnahme der Antarktis.

Häufigere Extremereignisse

Der menschliche Einfluss zeigt sich auch in Extremereignissen wie Dürreperioden, Überschwemmungen oder Hitzewellen. Das bedeutet natürlich nicht, dass sich einzelne solche Vorkommnisse wie die Rekordhitze im Sommer 2003 in Europa direkt dem menschengemachten Klimawandel zuschreiben ließen; denn extreme Wetterlagen haben in der Regel vielerlei Ursachen. Es bedeutet aber sehr wohl, dass durch menschliche Aktivitäten die Wahrscheinlichkeit solcher Ausreißer gestiegen ist.

Wie wird sich das Klima im Verlauf des 21. Jahrhunderts verändern? Antwort auf diese Frage suchen Forscher mit Simulationen, denen sie Schätzungen der künftigen Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen zu Grunde legen. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Klimaänderungen bei gleich bleibendem

Fakten zum IPCC

- Das IPCC wurde 1988 vom **Umweltprogramm der Vereinten Nationen** ins Leben gerufen. Es soll die vorliegenden wissenschaftlich-technischen Informationen über den Klimawandel bewerten. Das geschieht in einem Prozess, der darauf angelegt ist, eine hohe **Glaubwürdigkeit der Ergebnisse** auf wissenschaftlicher und politischer Ebene zu gewährleisten.
- **Umfassende Bewertungen** wurden 1990, 1995, 2001 und 2007 vorgelegt.
- **Drei getrennte Arbeitsgruppen** prüfen die physikalischen Hintergründe des Klimawandels, die Auswirkungen auf Natur und Gesellschaft und Methoden zur Schadensbegrenzung.
- **Chefautoren** für die Berichte der Arbeitsgruppen werden von den Vereinten Nationen berufen. Es sind namhafte Wissenschaftler, die sich selbst aktiv an relevanter Forschung beteiligen.
- In einem **Begutachtungsprozess** lieferten über 600 Sachverständige über 30 000 Kommentare zum Bericht der Arbeitsgruppe 1, auf dem dieser Artikel beruht.
- Jede Arbeitsgruppe bringt auch eine **Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger** heraus.

oder steigendem Ausstoß von Treibhausgasen sehr wahrscheinlich größer ausfallen werden als im 20. Jahrhundert. Selbst wenn wir die Emissionen unverzüglich so stark drosseln würden, dass die Treibhausgaskonzentrationen auf dem momentanen Niveau verharren, ginge die Erwärmung jahrhundertelang weiter.

Diese Trägheit des Klimasystems resultiert aus dem Zusammenwirken mehrerer Faktoren. Dazu gehören die Wärmekapazität der Weltmeere und die Jahrhunderte, die es dauert, bis durch die ozeanische Zirkulation die Wärme und das Kohlendioxid in die Tiefsee gelangt ist und sich ein neues Gleichgewicht unter den veränderten Bedingungen eingestellt hat.

Präziser gesagt: Den Modellprojektionen zufolge steigt die globale Mitteltemperatur für eine Spanne plausibler Emissionen in den kommenden zwanzig Jahren um durchschnittlich etwa 0,2 Grad Celsius pro Jahrzehnt. Das entspricht annähernd der Erwärmungsrate in den vergangenen dreißig Jahren. Ungefähr die Hälfte dieses Temperaturanstiegs in der nahen Zukunft haben wir bereits fest »gebucht«, weil das Klimasystem mit Verzögerung auf die aktuellen Konzentrationen der Treibhausgase in der Atmosphäre reagiert.

Erwärmung um bis zu vier Grad

Die Erwärmung bis zum Ende dieses Jahrhunderts hängt dagegen stark von der künftigen Kohlendioxid-Emissionsrate ab. Die Projektionen umfassen eine große Spanne von Szenarien. Sie reicht von sehr raschem bis zu moderatem Wirtschaftswachstum und von höherer zu geringerer Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen. Die überzeugendsten Schätzungen des langfristigen globalen Temperaturanstiegs für die verschiedenen Szenarien bewegen sich zwischen 1,8 und 4,0 Grad Celsius. Die regionalen Auswirkungen werden, wie die Projektionen mit größerer Sicherheit als je zuvor zeigen, denen in den vergangenen fünfzig Jahren gleichen, aber deutlich krasser ausfallen.

Außerdem geht aus den Simulationen hervor, dass die natürlichen Prozesse auf dem Land und in den Ozeanen, durch die Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernt wird, infolge der Erwärmung des Planeten an Wirksamkeit verlieren. Dadurch verbleibt mehr von dem emittierten Treibhausgas in der Luft, was wiederum den Temperaturanstieg beschleunigt. Diese fatale positive Rückkopplung zeigt sich in allen Klimamodellen. Große Unsicherheit herrscht allerdings noch über ihre Stärke. Sie hängt unter anderem davon ab, wie die Erderwärmung die Kohlenstoffaufnahme der Vegetation und des Bodens verändert.

Den Computermodellen zufolge beeinflusst der Klimawandel auch die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Ozeane. Der Meeresspiegel dürfte bis Ende des Jahrhunderts um etwa dreißig bis vierzig Zentimeter steigen, wobei der genaue Wert erneut von den Emissionen abhängt. Über sechzig Prozent des Anstiegs beruhen auf der thermischen Ausdehnung des Meerwassers. Doch möglicherweise beschleunigt sich das Abschmelzen der Eisschilde auf Grönland und in der Antarktis – wofür es neuerdings Anzeichen gibt. Der Meeresspiegel könnte sich dadurch um weitere zehn bis zwanzig Zentimeter erhöhen. Selbst ein wesentlich größerer Anstieg wäre möglich. Der erhöhte Gehalt der Atmosphäre an Kohlendioxid beeinflusst schließlich auch die Chemie der Ozeane. Bei vermehrter Aufnahme des Gases versauert das Meerwasser.

Die Polargebiete werden besonders betroffen sein. Dort steigt die Temperatur gemäß den Projektionen mit am stärksten an. Die Folgen zeigen sich vor allem im Sommer: Der Boden in den Permafrostregionen taut bis in größere Tiefen auf und das Meereises im Arktischen Ozean schrumpft dramatisch. In niedrigeren Breiten dürften mehr Hitzewellen, intensivere Niederschläge und stärkere Wirbelstürme sowie Taifune auftreten, die dafür aber vielleicht seltener sind.

Einige wesentliche Unsicherheitsfaktoren bleiben. Der wohl bedeutendste betrifft die Wolken. Wie sie auf einen Temperaturanstieg reagieren, hat großen Einfluss auf das Ausmaß der Erwärmung in den Projektionen. Die Komplexität der Wolken bedeutet allerdings, dass ihre Reaktion schwer einzuschätzen ist. Auch hier gibt es noch viel zu forschen.

Wir leben in einer Zeit, in der die Menschheit die Entwicklung der Erde und ihrer Bewohner entscheidend mitbestimmt. Die Kristallkugel, die uns die Klimamodelle für den Blick in die Zukunft bereitstellen, wird für Vorhersagen jenseits des Zeithorizonts von einem Jahrhundert leider immer trüber. Hinzu kommt unsere begrenzte Einsicht in die Reaktion der natürlichen Systeme und der menschlichen Gesellschaft auf die zunehmenden Folgen des Klimawandels. Eines steht jedoch fest: Pflanzen, Tiere und Menschen werden mit den Auswirkungen des Klimawandels mindestens bis zum Ende dieses Jahrtausends leben müssen. ◁

William Collins ist Professor in Residence in der Abteilung Erd- und Planetenwissenschaften an der Universität von Kalifornien in Berkeley sowie leitender Wissenschaftler am Lawrence Berkeley National Laboratory und am National Center for Atmospheric Research in Boulder (Colorado).

Robert Colman forscht in der Klimadynamikgruppe des Australian Bureau of Meteorology Research Center in Melbourne.

James Haywood leitet die Aerosolforschung beim britischen Wetterdienst in Exeter.

Martin R. Manning ist Direktor der Support Unit der IPCC-Arbeitsgruppe I im Earth System Research Laboratory der National Oceanic & Atmospheric Administration in Boulder (Colorado).

Philip Mote ist Professor für Klimatologie in der Abteilung Atmosphärenwissenschaften der Universität von Washington in Seattle.

Alle Autoren haben in der Arbeitsgruppe I am IPCC-Bericht von 2007 mitgearbeitet.

Weblinks zu diesem Thema: www.spektrum.de/artikel/903043
Weitere relevante Informationen aus dem Spektrum-Verlag: www.spektrum.com/klimawandel

FOTOS VON LINKS NACH RECHTS: 1. ISTOCKPHOTO; 2. ISTOCKPHOTO, HASAN KURSAD ERGAN; 3. AURORA PHOTOS, JPN, JIM REED; 4. CORBIS-BETTMANN; 5. ISTOCKPHOTO, RICK RHAY; GRAFIK RECHTS: DANIELA NAOMI MOLNAR, NACH: IPCC UND UCAR

Bedrohte Zukunft: das regionale Bild

Hier sind einige der gravierenden Folgen des Klimawandels aufgeführt, die laut jüngstem Bericht des IPCC in verschiedenen Teilen der Welt bis Ende dieses Jahrhunderts drohen. Das Gremium bezeichnet die meisten der genannten Entwicklungen als wahrscheinlich oder sehr wahrscheinlich. Genauere Aussagen stehen im Internet unter www.ucar.edu/news/features/climatechange/regionalimpacts.jsp und auf der IPCC-Website (www.ipcc.ch).

EUROPA

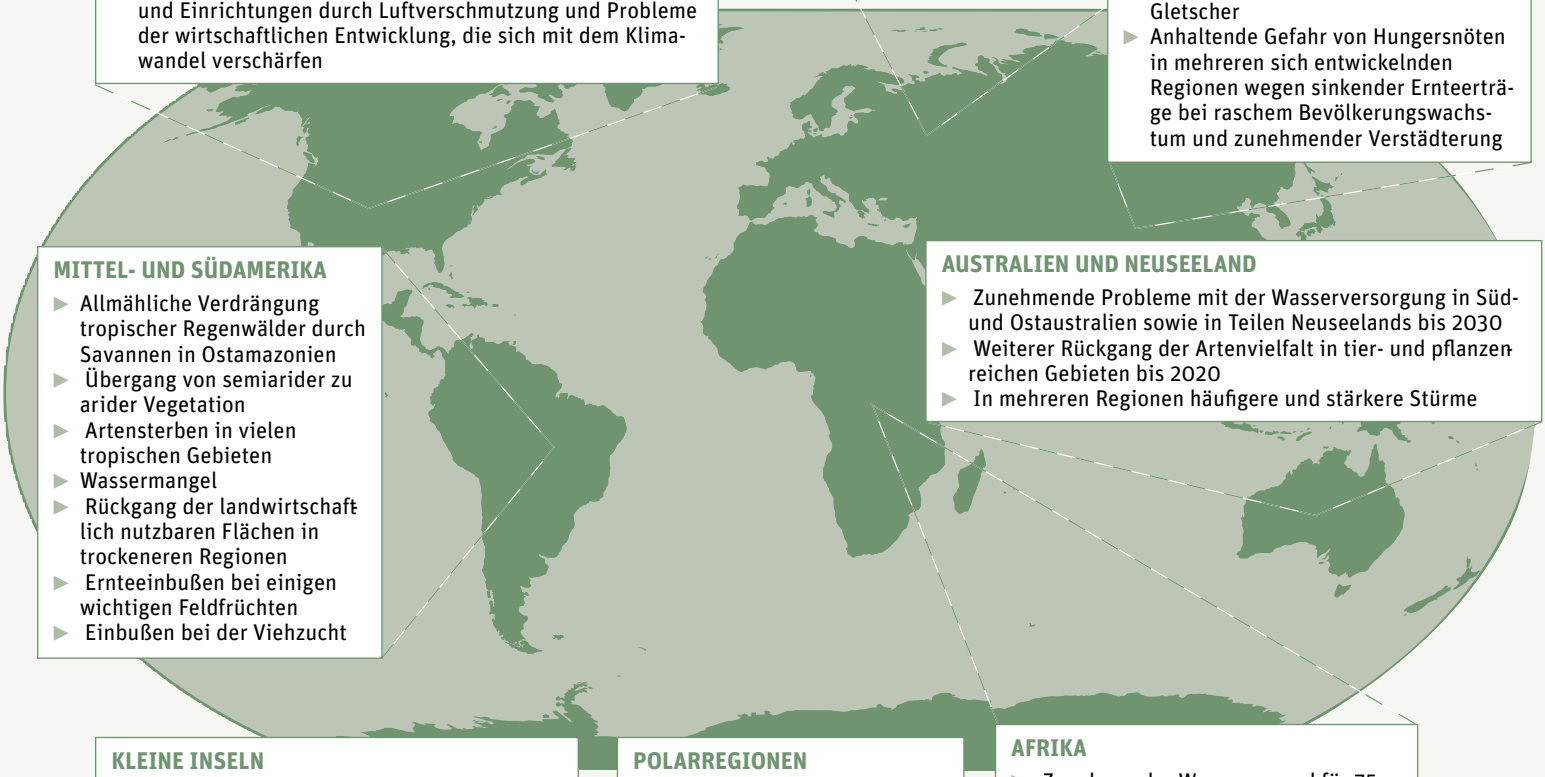
- Erhöhtes Hochwasserrisiko im Inland
- Im Süden vermehrt gesundheitsgefährdende Hitzewellen, Waldbrände, Wassermangel, Leistungseinbußen bei Wasserkraftwerken, Ernteausfälle und Rückgang des Sommertourismus
- In Mittel- und Osteuropa vermehrt gesundheitsgefährdende Hitzewellen sowie Torfbrände, weniger Niederschläge im Sommer und Einbußen bei der Waldwirtschaft
- In Nordeuropa anfangs positive Auswirkungen wie geringerer Heizbedarf, steigende Ernteerträge und wachsende Wälder; schließlich überwiegen jedoch auch hier die schädlichen Folgen

NORDAMERIKA

- In den Gebirgen im Westen abnehmende Schneedecke, vermehrt Überflutungen im Winter und geringere Wasserführung der Flüsse im Sommer
- Eine verlängerte Risikoperiode für Waldbrände und erhebliche Ausweitung der jährlich niedergebrannten Gebiete
- Häufigere, stärkere und längere Hitzewellen in Städten, die schon in der Vergangenheit unter hohen Temperaturen im Sommer zu leiden hatten
- In Küstenregionen zunehmende Belastung der Bewohner und Einrichtungen durch Luftverschmutzung und Probleme der wirtschaftlichen Entwicklung, die sich mit dem Klimawandel verschärfen

ASIEN

- Vermehrt Hochwasser, Bergrutsche und Störungen der Wasserversorgung durch das Abschmelzen der Himalaya-Gletscher
- Anhaltende Gefahr von Hungersnöten in mehreren sich entwickelnden Regionen wegen sinkender Ernteerträge bei raschem Bevölkerungswachstum und zunehmender Verstädterung



MITTEL- UND SÜDAMERIKA

- Allmähliche Verdrängung tropischer Regenwälder durch Savannen in Ostamazonien
- Übergang von semiarider zu arider Vegetation
- Artensterben in vielen tropischen Gebieten
- Wassermangel
- Rückgang der landwirtschaftlich nutzbaren Flächen in trockeneren Regionen
- Ernteeinbußen bei einigen wichtigen Feldfrüchten
- Einbußen bei der Viehzucht

AUSTRALIEN UND NEUSEELAND

- Zunehmende Probleme mit der Wasserversorgung in Süd- und Ostaustralien sowie in Teilen Neuseelands bis 2030
- Weiterer Rückgang der Artenvielfalt in tier- und pflanzenreichen Gebieten bis 2020
- In mehreren Regionen häufigere und stärkere Stürme

KLEINE INSELN

- Bedrohung von Infrastruktur, Siedlungen und Anlagen durch den steigenden Meeresspiegel
- Wassermangel an vielen Orten bis Mitte des Jahrhunderts
- Stranderosion, Ausbleichen von Korallen und andere Verschlechterungen der Verhältnisse an den Küsten, dadurch Beeinträchtigung der Fischerei und des Tourismus
- Invasion fremder Arten, insbesondere auf Inseln in mittleren und höheren Breiten

POLARREGIONEN

- Ausdünnung und Schrumpfen von Gletschern und Eisdecken
- Rückgang der Meereisdecke und Permafrostgebiete in der Arktis
- Tieferes saisonales Auftauen der Permafrostgebiete

AFRIKA

- Zunehmender Wassermangel für 75 bis 250 Millionen Menschen bis 2020
- Verlust landwirtschaftlich nutzbarer Flächen, verkürzte Anbauzeiten und Ertragseinbußen in einigen Gegenden
- Sinkende Fischbestände in großen Seen

Eine ausführlichere Version dieses Kastens finden Sie online unter www.spektrum.de/artikel/904130

FLACHBILDSCHIRM

Neue Tapete oder neuer Fernseher?

Dank LCD- und Plasmatechnik kommt Fernsehen dem Kinoerlebnis immer näher.

Von Bernhard Gerl

Als die Fußballweltmeisterschaft 2006 aus Deutschland ein Sommermärchen machte, avancierte Fernsehen zum gesellschaftlichen Ereignis. Weil eine Vakuumbildröhre aber auf Grund des Gewichts auf Bilddiagonalen von maximal 36 Zoll (92 Zentimeter) begrenzt ist, gingen erstmals mehr Flachbildschirme als konventionelle Fernseher über die Ladentheke. Der Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) erwartet für dieses Jahr, dass der Anteil der Letzteren europaweit nur noch bei etwa 15 Prozent liegen wird. Die diesjährige Internationale Funkausstellung in Berlin war demgemäß ein Fest der Flachbildschirme.

Ein Bildpunkt, das so genannte Pixel, entsteht dort wie bei der guten alten Bildröhre durch additive Mischung der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau, während beim Röhrengerät Elektronenstrahlen jeweils eine dementsprechende Farbschicht zum Leuchten bringen.

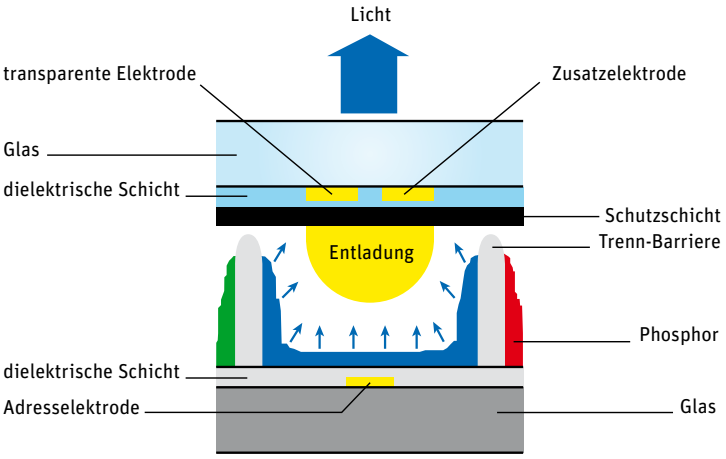
Von der Kombination aus Projektor und Leinwand abgesehen, konkurrieren hier vor allem zwei Techniken miteinander: das Liquid Crystal Display (LCD) und der Plasmabildschirm. Beim LCD-Monitor fungieren Flüssigkristalle als Lichtventile. Dazu werden aus dem Licht einer Hintergrundbeleuchtung zunächst Wellen einer bestimmten Polarisationsrichtung herausgefiltert. Um einen zweiten Filter passieren und damit aus dem Bildschirm austreten zu können, muss die Richtung gedreht werden. Diese Aufgabe erledigen Flüssigkristalle (siehe große Grafik), doch erst, nachdem sie selbst durch einen Spannungsimpuls um ihre Achse verdrillt wurden. Um den Kontrast der Bilder zu steigern, verwenden die Hersteller Flüssigkristalle, die sich stärker verdrehen können. Weil solche Kristalle die Wellenlänge des durchgehenden Lichts leicht verschieben, kombiniert man zwei Schichten und kompensiert diesen Effekt wieder. Die Ansteuerung der transparenten Elektroden erfolgt durch Dünnschichttransistoren (TFT), drei pro Bildpunkt entsprechen den drei mit Farbfiltern versehenen Subpixeln.

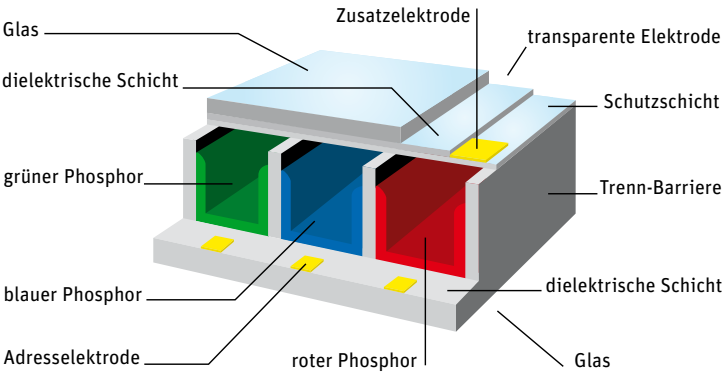
Beim Plasmamonitor umfasst ein Bildpunkt drei mit den Edelgasen Xenon, Neon und Helium gefüllte Kammern, die mit blauem, grünem beziehungsweise rotem Phosphor beschichtet sind. Eine Steuerspannung von hundert oder mehr Volt erzeugt das Plasma, ein Gemisch aus Elektronen und positiv geladenen Edelgasionen. Finden die Ladungsträger wieder zu neutralen Atomen zusammen, wird ultraviolette Strahlung im Bereich zwischen 140 bis 190 Nanometer frei. Diese regt den Leuchtstoff an, umso heller, je länger die Entladung anhält. Zusätzliche Filter sorgen dafür, dass die schädliche Strahlung nicht austreten kann.

Zwar verbrauchen Plasmabildschirme mehr Strom als solche mit LCD-Technik, doch sie erreichen eine höhere Leuchtdichte und strahlen ihr Licht in einem größeren Winkel ab. Zudem können sie mehr Farben darstellen und ihr Schwarz wirkt schwärzer. Obendrein sind LCD-Fernseher auf eine Bildschirmdiagonale von neuerdings 57 Zoll (etwa 144 Zentimetern) beschränkt, während die Konkurrenz 70 Zoll (177 Zentimeter) erreicht. Außerdem bauen sich Bilder beim LCD-Monitor langsamer auf, was bei raschen Bewegungen als Nachzieheffekt zu sehen sein kann.

Allerdings sind Plasmafernseher derzeit noch deutlich teurer. Problematisch ist auch, dass viele Sendungen im Bildformat 4:3 ausgestrahlt werden (beispielsweise Wiederholungen alter Filme), nicht in dem 16:9-Format, auf das Flachbildschirme ausgelegt sind. Es verbleibt also links und rechts ein schwarzer Rand, der sich mit der Zeit »einbrennt« – die Leuchtstoffbeschichtung altert nicht gleichmäßig. Letztlich aber bleibt es eine Frage von Geschmack und Geldbeutel, welche Technik ein Kunde bevorzugt.

Bernhard Gerl ist Technikjournalist in Mainz.





Ein Bildpunkt eines Plasmabildschirms besteht aus drei Kammern: einer roten, einer grünen und einer blauen. Ultraviolette Strahlung, die nach der Zündung des Plasmas frei wird, regt die farbigen Phosphorschichten zum Leuchten an.

Wussten Sie schon?

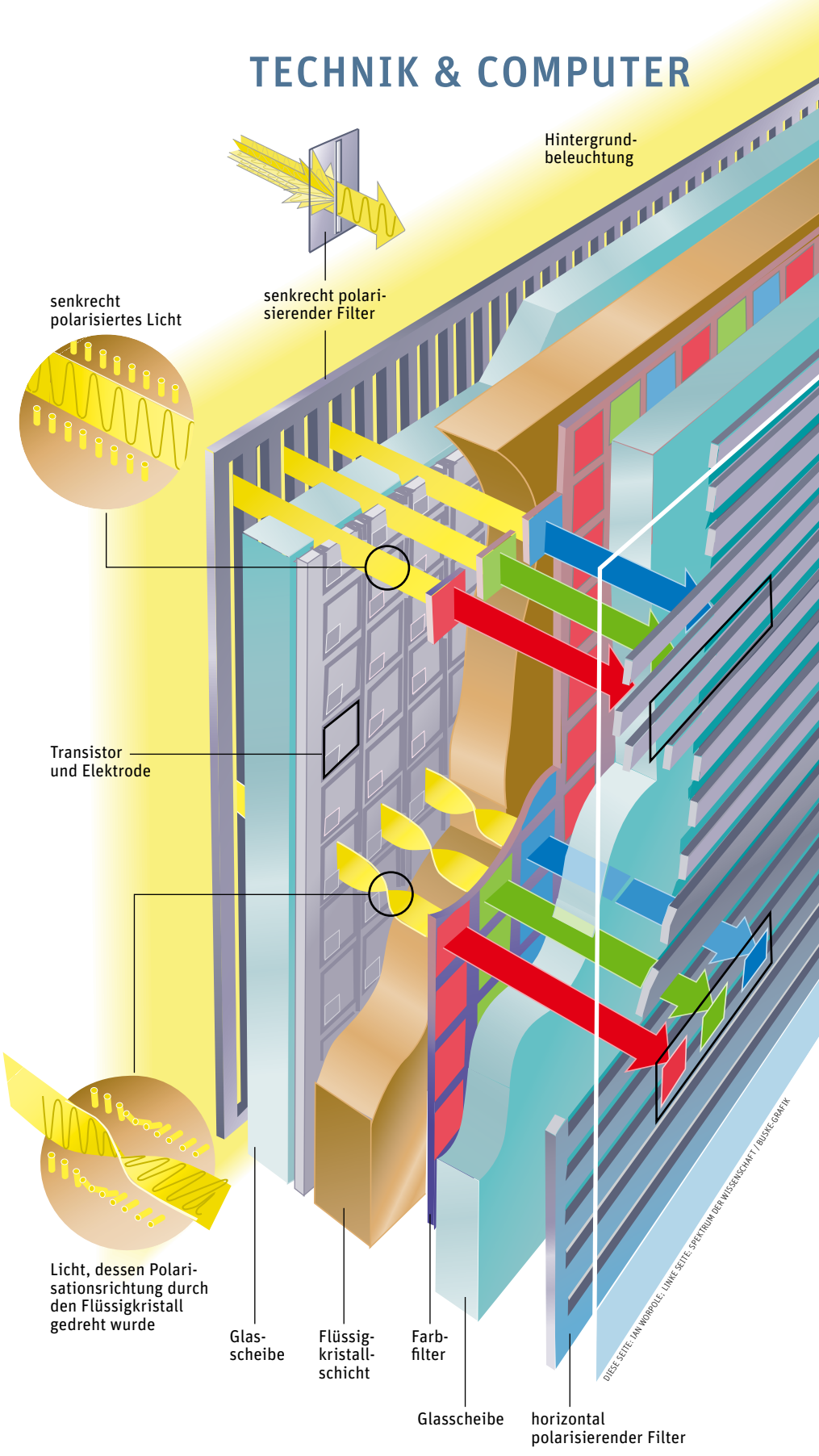
Den ersten Plasmabildschirm bauten Donald L. Bitzer und H. Gene 1964 für den Großrechner PLATO VI der Universität von Illinois. Röhrenmonitore als Computer-Anzeigegerät erwiesen sich aber als preiswerter. Erst die tragbaren Computer zu Beginn der 1980er Jahre brachten die Entwicklung wieder in Gang, dabei setzte sich die LCD-Technik dank ihres geringeren Stromverbrauchs durch.

Hersteller geben die Lebensdauer ihrer Bildschirme mit 30 000 bis 60 000 Stunden an. Erst dann habe die Leuchtkraft um die Hälfte nachgelassen. In Deutschland läuft ein TV-Gerät durchschnittlich 170 Minuten am Tag, also mindestens knapp dreißig Jahre. Ob dieses Kriterium wirklich zum Vergleich von Technologien und Geräten taugt?

Wie im Kino kann auch beim Fernsehen ein zu großes Bild die Wahrnehmungsfähigkeit überfordern; Übelkeit und Kopfschmerzen sind die Folgen. Außerdem erkennt man bei zu geringem Abstand einzelne Pixel. Hersteller empfehlen deshalb für 42-Zoll-Bildschirme einen Betrachtungsabstand von 3,20 bis 4,30 Metern, für 50-Zoll-Geräte seien 5,10 bis 6,40 Meter angemessen.

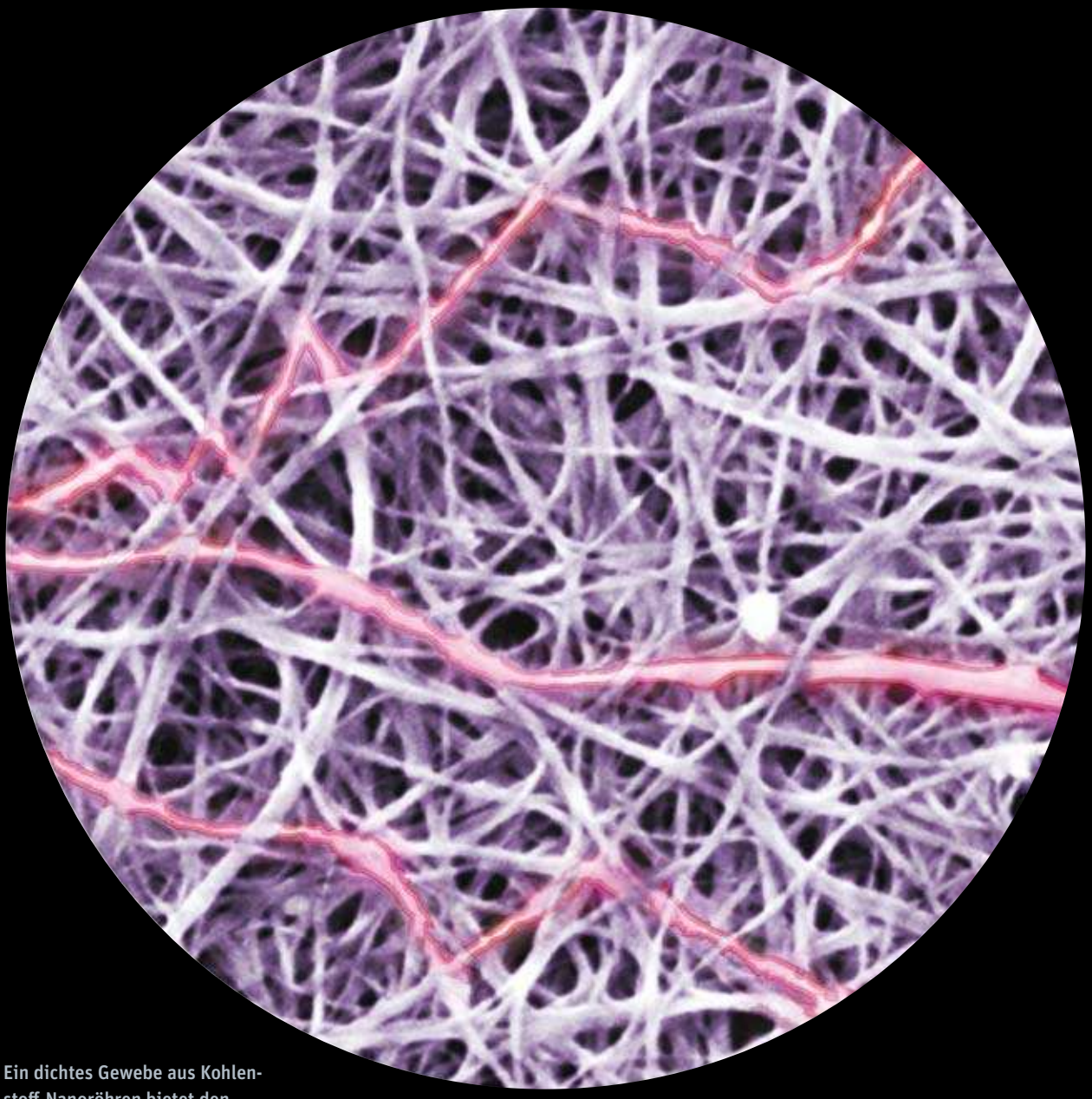
Der in Europa gebräuchliche PAL-Standard schreibt eine Bildauflösung von 576 Zeilen vor. In absehbarer Zeit wird sich aber wohl der HDTV-Standard durchsetzen, der mindestens 720 Zeilen vorschreibt. Dafür geeignete Bildschirme tragen das werbewirksame Logo »HD-ready«, ein Industriestandard, der Minimalforderungen des hoch aufgelösten Fernsehens erfüllt.

Auf der diesjährigen Internationalen Funkausstellung präsentierten vor allem deutsche Hersteller integrierte Systeme, die bereits über Digitalreceiver für den Satelliten-, Kabel- oder Antennenempfang, Festplattenrekorder und WLAN-Router für den Datentransfer von externen Speichern verfügen.



Beim LCD-Bildschirm steuern Dünnschichttransistoren transparente Elektroden an, um Flüssigkristalle durch Spannungssignale zu verändern. Polarisiertes Licht wird dann gedreht und kann aus dem Monitor austreten, oder es bleibt unverändert und wird dann von einem Filter zurückgehalten.

KOHLENSTOFF-NANONETZE für die Elektronik



Ein dichtes Gewebe aus Kohlenstoff-Nanoröhren bietet den Elektronen mehrere Alternativwege (rot) und stabilisiert damit die Leitfähigkeit. Der Durchmesser des Ausschnitts beträgt 0,7 Mikrometer (tausendstel Millimeter).

CARL ZEISS SMT, JOHN YORSTON / APL MICROSCOPIC, ANDREW P. LEONARD / EINFÄRBUNG: JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Aus einem Geflecht winziger Kohlenstoffröhren wird in den nächsten Jahren preiswertes elektronisches Gerät hervorgehen. Zu den jetzt schon absehbaren Anwendungen zählen neuartige Transistoren, gedruckte Solarzellen und elektronisches Papier.

Von George Gruner

In einigen klassischen Sciencefiction-Geschichten beruht außerirdisches Leben nicht auf Kohlenstoff, dem Grundbaustein irdischer Organismen, sondern auf Silizium, dem typischen Material der modernen Elektronik. Manche Wissenschaftler hoffen tatsächlich, eines Tages Lebensformen auf Siliziumbasis erschaffen zu können. Stattdessen beginnt sich eher das Umgekehrte abzuzeichnen: Kohlenstoff dient als Grundlage für elektronische Bauteile.

Das wirkt zunächst überraschend. Haben wir nicht in der Schule gelernt, dass Kohlenstoff, ob als Graphit oder als Diamant, Strom sehr schlecht leitet? Doch in den vergangenen fünfzehn Jahren haben Wissenschaftler neue Kohlenstoffformen entdeckt: winzige Strukturen aus einigen hundert bis tausend Atomen, die bereitwillig Elektronen transportieren. Besonders interessant ist die Nanoröhre, ein Molekül, das aussieht wie eingerollter Maschendrahtzaun – nur dass dieser Maschendraht aus einer Kohlenstoffschicht besteht, die hundert Millionen Mal feiner ist als der Zaun für einen Hühnerkäfig.

Wie sich nun herausstellt, können ungeordnete Netze aus solchen Nanoröhren vielerlei elektronische Funktionen übernehmen. Durch chemische Bearbeitung vermögen Nanonetze die Eigenschaften von metallischen Leitern wie Kupfer nachzuahmen – oder von Halbleitern wie Silizium. Auf Grund seiner Wandlungsfähigkeit vermag dieses seltsame Material unterschiedliche Rollen in elektronischen Geräten zu spielen.

Ein weiterer Vorteil: Solche Komponenten aus Kohlenstoff lassen sich ohne großen Aufwand fabrizieren. Forscher suspendieren die Röhrchen in einer Flüssigkeit und sprühen sie dann als dünne Schicht auf biegsame Plastikfolien. Oder sie können das Material auf aktive Schichten auftragen oder drucken, die ihrerseits elektronische Funktionen ausüben – etwa Substrate, die bei Anlegen einer Spannung Licht aussenden.

Man braucht nicht viel Fantasie, um sich nach diesem einfachen Prinzip viele extrem billige und praktische Produkte auszumalen: »elektronisches Papier«, das wechselnde Informationen auf flexiblen, zusammenrollbaren Blättern darstellt; chemische Sensoren; tragbare elektronische Geräte; auf Dachziegel gedruckte Solarzellen; und große Mengen einfacher Sensoren, die mittels Funkerkennung Warenbestände in Lagerhäusern oder Supermärkten verfolgen. Für solche Anwendungen ist weder die blitzschnelle Rechenleistung eines teuren Chips nötig noch ein modernes Bildschirmsystem. Darum suchen Forschungslabors und Start-up-Unternehmen nun um die Wette nach Geräten auf Kohlenstoffbasis, die ausreichend viel leisten und möglichst wenig kosten (siehe die Tabelle auf S. 91).

Flexibel, transparent und billig

Derartige Zielvorgaben würden die herkömmliche Elektronik ziemlich überfordern, denn die gewünschten Materialien müssen leitfähig, biegsam, leicht und – zumindest für Solarzellen und Displays – durchsichtig sein. Die meisten Leiter sind Metalle und somit nicht lichtdurchlässig, während dünne Schichten aus durchsichtigem Material, etwa Diamant, wiederum keinen Strom leiten. Allerdings vermag Licht eine spezielle Sorte von Metallen zu durchdringen: die so genannten Metalloxide. Vor allem Indiumzinnoxid wird oft für durchsichtige Elektroden genutzt. Aber Metalloxide sind nicht nur teuer, sondern obendrein schwer und spröde. Ihre Fabrikation erfordert hohe Temperaturen und Milliarden Dollar teure Anlagen.

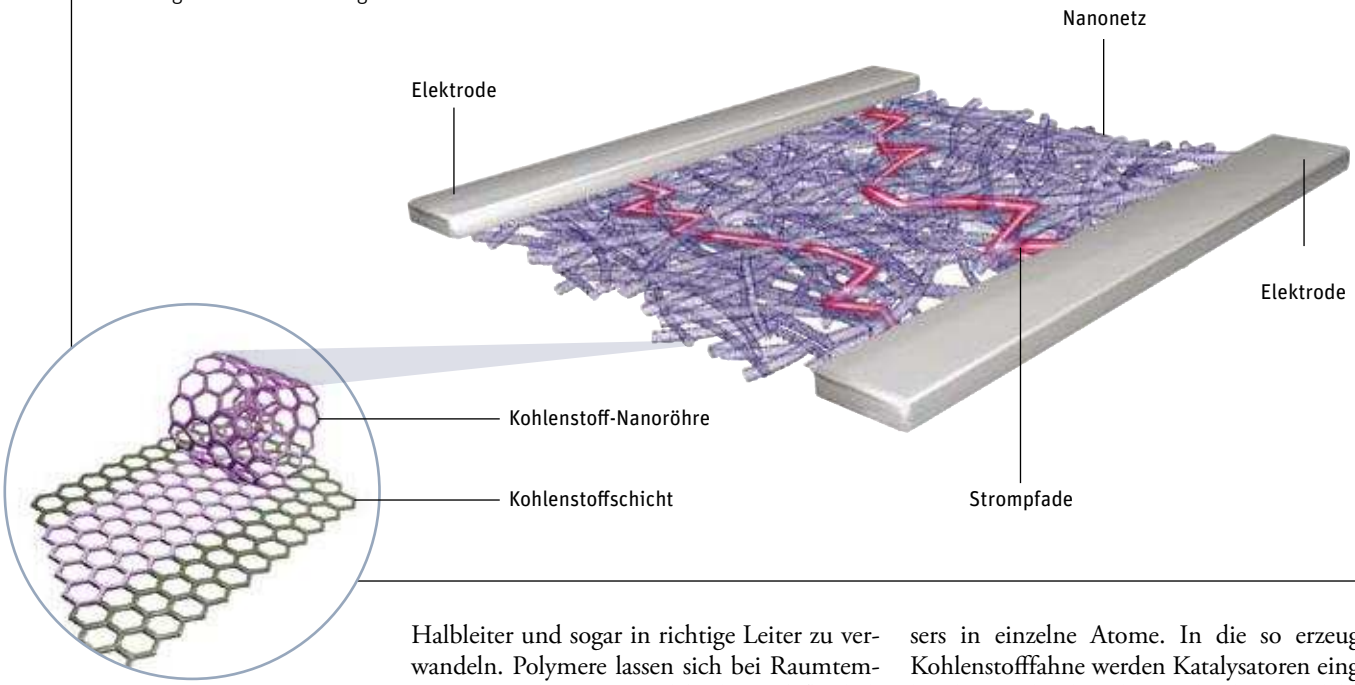
Eine Alternative ist eine ungewöhnliche Art von Kunststoffen, so genannte leitfähige Polymere. Normale Kunststoffe sind Isolatoren, aber in den letzten Jahrzehnten ist es Chemikern gelungen, einige Polymere in

In Kürze

- **Nanoröhren** – mikroskopisch kleine Zylinder aus eingerollten Kohlenstoffschichten – sind gute Leiter und eignen sich darum für elektronische Anwendungen. Doch Bauteile aus einzelnen Röhren sind teuer in der Herstellung und arbeiten nicht zuverlässig.
- **Nanonetze** – regellose Netze aus zahlreichen Nanoröhren – können viele elektronische Grundfunktionen zu geringen Kosten ausführen. Wegen ihrer Robustheit eignen sie sich besonders für tragbare Geräte.
- Schon in wenigen Jahren könnten Kohlenstoff-Nanonetze in **Sensoren, Solarzellen, elektronischem Papier und biegsamen Touchscreens** Verwendung finden.

Wie ein Kohlenstoff-Nanonetz funktioniert

Dünne Netze aus Nanoröhren können als elektronische Bauteile dienen. Jede Nanoröhre ist eine nur ein Atom dicke Kohlenstoffschicht, die sich von selbst zu einem Zylinder einrollt. Mit rund einem Nanometer Durchmesser ist die Röhre (Teilbild) 50 000-mal dünner als ein menschliches Haar. Der Strom bahnt sich seinen Weg durch das Röhrengewirr von einer Elektrode zur anderen.



JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

Die elektrische Leitfähigkeit von Nanoröhren gleicht der von Kupfer – und obendrein sind sie mechanisch robust

Halbleiter und sogar in richtige Leiter zu verwandeln. Polymere lassen sich bei Raumtemperatur produzieren, sind leicht und flexibel, beliebig formbar und spottbillig. Der Nachteil: In den meisten Polymeren sind die Atome schwach gebunden, wodurch diese Kunststoffe mit der Zeit zerfallen. Wem nützt eine Solarzelle, die schon nach wenigen Sonnentagen kaputtgeht? Darum schlägt jetzt die Stunde der Nanodrähte.

Ein besserer Draht

Nanoröhren aus Kohlenstoff wurden schon vor Jahrzehnten entdeckt, aber damals erkannte niemand ihren Wert. Im Jahr 1991 stieß der japanische Chemiker Somio Ijima von der Firma NEC erneut auf die winzigen Kohlenstoffröhren mit rund einem Nanometer (millionstel Millimeter) Durchmesser – ungefähr so dick wie ein Strang eines DNA-Moleküls. Ihre elektrische Leitfähigkeit gleicht der von Kupfer und übertrifft die eines jeden Polymers um mehrere Größenordnungen. Außerdem können Nanoröhrchen mehr als hundertmal so viel Strom leiten wie die besten Metalldrähte. Überdies sind sie mechanisch robust: Sie lassen sich leicht biegen, reagieren mit den meisten Chemikalien nicht und erleiden im täglichen Gebrauch kaum Schaden.

Um die Gebilde herzustellen, zerlegt man Kohle in der Hitze eines Lichtbogens oder Lasers in einzelne Atome. In die so erzeugte Kohlenstofffahne werden Katalysatoren eingebracht, wodurch sich verschiedene Molekülformen bilden. Die relativ einfache Prozedur liefert im Wesentlichen Ruß; unter den zahlreichen Molekülarten findet man kugelförmige Strukturen – so genannte Fullerene – und hohle Stäbchen. Das Abtrennen der Röhrchen aus dieser Mixtur ist mühsam; begehrt sind die langen, fast perfekten Exemplare, die nur eine einzige Wand haben, nicht mehrere konzentrische Wände. Deshalb kommen passende Nanoröhren derzeit recht teuer, aber die Hersteller erwarten, dass die Kosten bei steigender Nachfrage durch Fabrikation großer Mengen deutlich fallen werden.

Ein Transistor – der Miniaturschalter, auf dem die moderne Elektronik beruht – kann schon mit einer einzelnen Nanoröhre funktionieren und damit die Leistung herkömmlicher Siliziumtransistoren ohne Weiteres übertreffen. Dennoch werden einzelne Kohlenstoffröhren in absehbarer Zukunft Silizium und Kupfer nicht ersetzen. Das Haupthindernis ist die schwierige und kostspielige Herstellung. Es dauert Tage, aus einem einzelnen Röhrchen – oft in Handarbeit – ein Bauteil zu fabrizieren. Außerdem variiert das elektronische Verhalten allzu sehr, denn Nanoröhren nehmen etwas unterschiedliche Formen an, und das beeinflusst ihre elektrischen Eigenschaften.

Zwar gleicht keine Röhre exakt der anderen, doch diese Unterschiede lassen sich ausgleichen, wenn viele Röhren zusammenspielen: Die Mängel der einen werden durch andere, besser funktionierende kompensiert. Das einfachste Beispiel ist ein zufälliges Gewirr aus leitfähigen Nanoröhren – ein Nanonetz (siehe Kasten links). Wie ein Autobahnnetz, das bei Stau Ausweichstrecken bietet, liefert das winzige Geflecht den Elektronen Alternativrouten. Bald stellte sich heraus, dass solche nahezu zweidimensionalen Zufallsnetze weitere attraktive Eigenschaften haben.

Vom Draht zum Netz

Zunächst garantieren die vielen Leitungen und Verbindungen des Netzes selbst bei Herstellungsmängeln gute elektrische Leitfähigkeit zwischen zwei Elektroden. Durch die vielfältigen Pfade, die das Netz anbietet, entsteht eine hohe Fehlertoleranz: Wenn eine Route im Gebrauch versagt, gibt es mehrere andere, die den Ausfall kompensieren.

Tatsächlich ist das leitfähige Nanonetz ein einfaches Beispiel für so genannte Perkolation; der Begriff meint ursprünglich das Sickern einer Flüssigkeit durch ein festes Substrat. Allgemein beschreibt die Perkolationstheorie, wie Objekte, Materialien oder elektrischer Strom durch ein zufällig strukturiertes Medium wandern. Angenommen, wir lassen Stäbchen eines nach dem anderen auf eine Tischplatte fallen. Bei wenigen Stäbchen ist die Chance gering, einen zusammenhängenden Weg zu finden, der von einem Stäbchen zum anderen quer über die Tischplatte führt. Unterhalb einer kritischen Stäbchendichte fällt die Chance sogar auf null. Doch bei wachsender Stäbchenzahl wird der Stapel schließlich die kritische Dichte – die so genannte Perkolationsschwelle – übersteigen und immer mehr gangbare Wege bilden.

Wenn wir das Stäbchenbild auf Kupferdrähte übertragen, wird das Netz zu einem bestimmten Zeitpunkt über den Tisch hinweg leitfähig, wobei der Strom von der Dichte der Kupferdrähte abhängt. Theoretiker haben diesen Ansatz vor einiger Zeit untersucht, und meine Gruppe an der Universität von Kalifornien in Los Angeles (UCLA) konnte eine Perkolationsschwelle für Netze aus Nanoröhren formulieren.

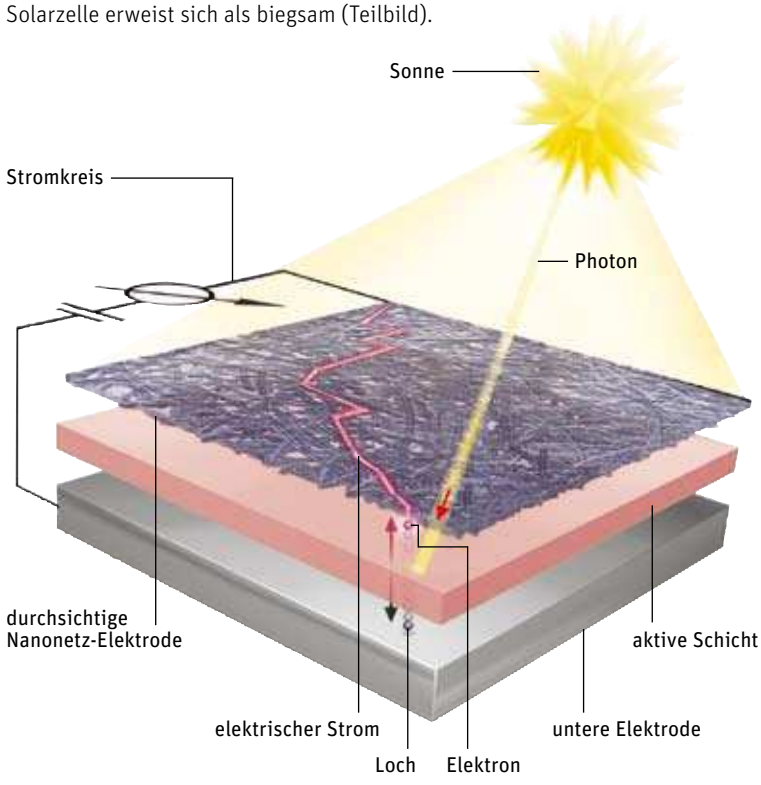
Solche Geflechte können außerdem fast ganz durchsichtig sein – ein Vorteil für Anwendungen, die Lichtdurchlässigkeit erfordern. Wie das Autobahnnetz, dessen Fahrbahnen nur einen Bruchteil des gesamten Einzugsgebiets bedecken, lässt ein Netz aus langen und dünnen Drähten das einfallende Licht größtenteils durch – sogar zu hundert Prozent, wenn man Nanodrähte als eindimensionale Gebilde behandelt.

Und zu guter Letzt ist ein Netz aus Nanodrähten ähnlich wie ein Spinnennetz viel widerstandsfähiger als ein kompakter Klumpen aus demselben Material, welches bei Verbiegung leicht bricht. Dank dieser Eigenschaften eignen sich Nanonetz-Bauteile hervorragend für alltäglichen Gebrauch und Missbrauch; man bedenke nur, wie oft ein Handy zu Boden fällt.

Das alles sind viel versprechende Vorteile, aber wenn ein neues Material ältere verdrängen soll, muss es natürlich hinsichtlich Leistung und Kosten deutlich überlegen sein. Die Nanoröhrenschichten, die mein Team sowie eine Gruppe um den Physiker Siegmar Roth vom Max-Planck-Institut für Festkörperphysik in Stuttgart und ein Team an der Universität von Texas in Austin vor einigen Jahren herstellten, leisteten das noch nicht. Es war

Billigere Solarzellen

Durchsichtige und biegsame Nanonetz-Elektroden wären deutlich billiger als die starren Indiumzinnoxid-Elektroden in heutigen Solarzellen. Die Nanonetze leiten die durch Lichtquanten aus der aktiven Schicht eines Halbleiters vertriebenen Ladungsträger – negative Elektronen und positive Löcher – zu einem externen Stromkreis. Eine gedruckte Nanonetz-Solarzelle erweist sich als biegsam (Teilbild).



GRAFIK: JEAN-FRANÇOIS PODEVIN; FOTO: REDUX, BRAD SWONETZ; SOLARZELLE: UNIVERSITÄT STANFORD

überhaupt nicht einfach herauszufinden, wie die Röhren am besten zu erzeugen und auf Oberflächen abzuscheiden sind.

Gewiss lassen sich dünne Netzschichten nicht einfach fabrizieren, indem man wie beim Mikadospiel ein Röhrchen nach dem anderen fallen lässt. Man könnte die Röhren beispielsweise in ein Lösungsmittel – Wasser, Alkohol, organische Flüssigkeiten – einbringen und die Lösung auf eine Oberfläche sprühen, doch das ist nicht so einfach, wie es klingt. Da die Röhren in einer Flüssigkeit zusammenklumpen, ist ein chemischer Zusatz nötig, der sie getrennt hält.

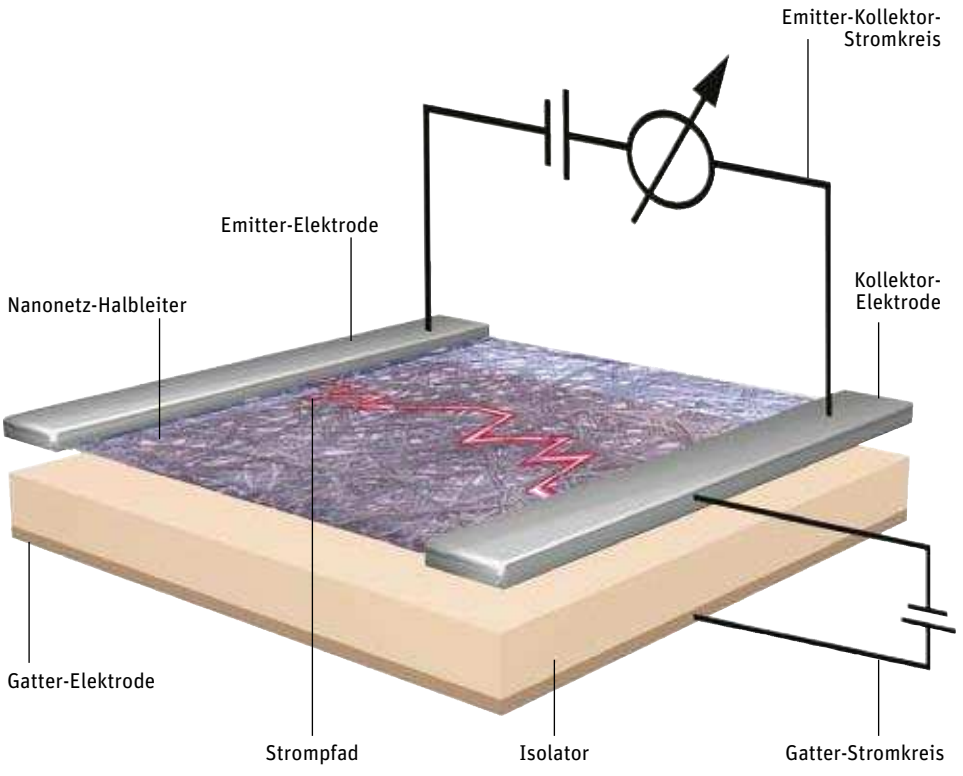
Wenn Seife Elektronen blockiert

So genannte Tenside bringen das fertig, indem sie die Röhren vollständig umgeben. Doch wenn diese seifenartigen Substanzen auf den Röhren kleben bleiben, nachdem diese auf eine Oberfläche gesprüht wurden, behindern sie den Elektronenfluss – sie blockieren gleichsam die Autobahnauffahrten. Erst durch Versuch und Irrtum mit unzähligen Lösungsmitteln, Tensiden und Verarbeitungsprozeduren fanden Forscher einfache Wege, bei Zimmertemperatur dünne Nanonetzfilme herzustellen. Gegenwärtig liefert eine Methode, die mein Team und eine Gruppe um den Chemiker Andrew Rinzler von der Universität Florida entwickelt haben, Schichten mit dem geringsten elektrischen Widerstand.

Als Forscher mit der Leitfähigkeit der Röhren experimentierten, fanden sie nebenbei heraus, dass das Material durchsichtig sein kann – eine für Bildschirme und Solarzellen wichtige Eigenschaft. Die ersten Hinweise ergaben sich 2001, als mein früherer Mitarbeiter Leonardo Degiorgi und seine Gruppe an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich zusammen mit dem Physiker David Tanner und seinen Kollegen an der Universität von Florida die optischen Eigenschaften dicker Nanonetzschichten untersuchten, um deren Leitfähigkeit präzise zu messen. Die Schichten waren zwar zu dick, um Licht durchzulassen, aber die gewonnenen Daten ließen darauf schließen, dass ein dünnerer Film sowohl durchsichtig als auch leitfähig sein würde. Nach dieser Entdeckung führten Rinzlers Gruppe zusammen mit Katalin Kamarás vom Zentralinstitut für Physik in Budapest sowie mein Team an der UCLA direkte Transparenzmessungen an Nanonetzfilmen durch. Heute vermögen Forscher durch Variieren der Schichtdicke Filme mit maßge-

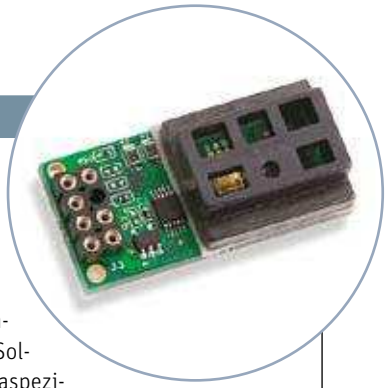
Transparente Transistoren

Wenn dünne Nanonetzschichten so präpariert werden, dass sie wie Halbleiter funktionieren, können sie als Grundlage für Feldeffekttransistoren dienen – wichtige Bauteile für Computer, Handys und andere digitale Geräte. Bei einem solchen elektronischen Schalter steuert die schwache Spannung der Gatter-Elektrode den viel stärkeren Strom im Emitter-Kollektor-Stromkreis. Im kleinen Teilbild biegt ein Techniker ein Kunststoffblättchen, auf das mehrere durchsichtige Nanonetz-Transistoren gedruckt wurden.

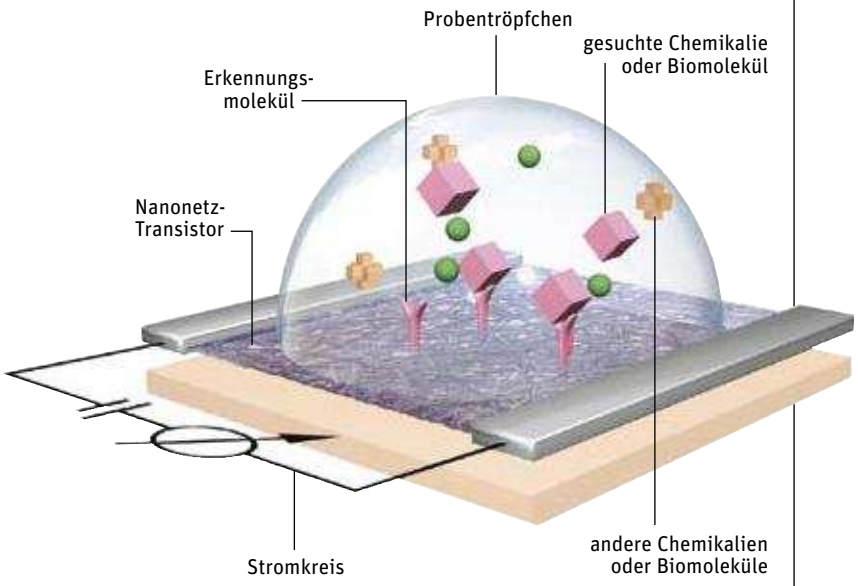


GRAFIK: JEAN-FRANÇOIS PODEVIN; FOTO: REDUX; BRAD SWONETZ: NANONETZ-TRANSISTOREN: UNIDYM

Preiswerte Sensoren



Durch Hinzufügen von »Erkennungsmolekülen« wird ein Nanonetzgerät zu einem Sensor, der auf eine bestimmte chemische Substanz oder ein Biomolekül reagiert. Wenn sich das gesuchte Molekül an ein Erkennungsmolekül bindet, verändert dies den elektrischen Output des Sensors. Solche Geräte können beispielsweise das prostataspezifische Antigen (PSA) anzeigen – ein im Blut auftretendes Indiz für möglichen Prostatakrebs – oder demnächst auch Mikroorganismen wie das Anthraxbakterium, eine mögliche Biowaffe. Anordnungen von Nanonetz-Sensoren, die mit unterschiedlichen Erkennungsmolekülen ausgestattet sind, könnten spezielle Gene oder Proteine für medizinische Zwecke erkennen. Das Teilbild zeigt einen schwarzen Nanonetz-Detektorchip auf einer Platine mit gedruckten Schaltkreisen.



GRAFIK: JEAN-FRANÇOIS PODEVIN, SENSOR: NANOMIX SENSATION

schneiderter Transparenz und Leitfähigkeit herzustellen. Bald richtete sich das Interesse auf Halbleiter aus Nanonetzen, die als Grundlage für Transistoren dienen können. Dafür benötigt man Materialien, deren Leitfähigkeit sich selbst bei kleinen Schwankungen eines Inputs, etwa eines elektrischen Feldes, sehr stark ändert (siehe Kasten links).

Transistoren aus Kohlenstoff

Dass Dünnschicht-Feldeffekttransistoren mit Kohlenstoff-Nanonetzen funktionieren, wurde vor rund sieben Jahren erkannt. Danach gab es rasche Fortschritte zu transparenten Nanonetzen auf biegsamen Substraten. Mein Forschungs- und Entwicklungsteam bei Nanomix, einer Start-up-Firma in Emeryville (Kalifornien), sowie ein Team am Naval Research Laboratory in der US-Bundeshauptstadt Washington um den Werkstoffwissenschaftler Eric Snow produzierten 2003 gleichzeitig Nanonetztransistoren. Doch diese

Spektrum der Wissenschaft
D I G I T A L

In unserem Archiv finden Sie alle bisher erschienenen **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993.

- Sie können nach einzelnen Artikeln recherchieren und diese als PDF-Dateien für € 1,– kaufen.
- Wir bieten Ihnen auch die einzelnen **Spektrum der Wissenschaft**-Ausgaben komplett als digitales Heft für € 5,– an. Somit sind auch ältere, bereits vergriffene Ausgaben wieder für Sie erhältlich.
- Sie können **Spektrum der Wissenschaft** auch komplett als Digital-Ausgabe für € 60,– im Jahr abonnieren: www.spektrum.de/digitalabo

Spektrum-Abonnenten haben freien Zugriff auf die Digital-Ausgaben!

Zugang zum Archiv finden Sie unter

www.spektrum.de/archiv

Spektrum der Wissenschaft Wissen aus erster Hand

Aktive Forschung und Entwicklung

Viele Organisationen arbeiten an Materialien aus Kohlenstoff-Nanoröhren und Nanonetzschichten sowie an entsprechenden elektronischen Bauteilen. Jede neue Technologie durchläuft in der Regel folgende Etappen: Entwurf, Forschung und Entwicklung, Machbarkeitsstudie, Produktentwicklung und Produktion.

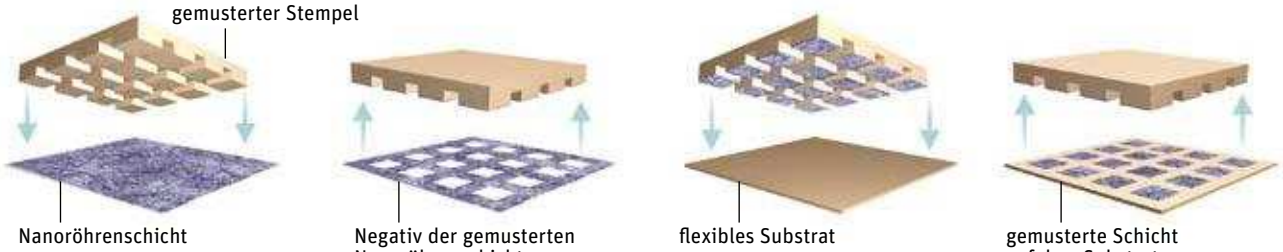
Organisation	Produktschwerpunkt	Status
Materialien für die Elektronik		
CarboLex, Lexington (Kentucky) (www.carbolex.com)	Herstellung mittels Lichtbogen und chemischer Gasphasenabscheidung (CVD)	Produktion
Carbon Nanotechnologies, Houston (Texas) (www.cnanotech.com)	Herstellung mittels CVD und Kohlenmonoxid	Produktion
Carbon Solutions, Riverside (Kalifornien) (www.carbonsolution.com)	Herstellung mittels Lichtbogen	Produktion
SouthWest NanoTechnologies, Norman (Oklahoma) (www.swnano.com)	spezielle Nanoröhren mittels CVD	Produktion
Thomas Swan, Consett (England) (www.thomas-swan.co.uk)	Herstellung mittels CVD in großen Mengen	Produktion
Transparente Schichten		
Battelle Memorial Institute, Columbus (Ohio) (www.battelle.org)	transparente Beschichtungen	Forschung und Entwicklung
Eikos, Franklin (Massachusetts) (www.eikos.com)	leitfähige Tinte	Produktentwicklung
Eastman Kodak, Rochester (New York) (www.kodak.com)	transparente optische Beschichtungen	Forschung und Entwicklung, Prototypen
Unidym, Menlo Park (Kalifornien) (www.unidym.com)	Schichten für Touchscreens, Solarzellen, Leuchtdioden	Produktentwicklung
Geräte		
DuPont, Wilmington (Delaware) (www.dupont.com)	transparente Elektronik	Forschung und Entwicklung
IBM, Armonk (New York) (www.ibm.com)	Transistoren und Verbindungen für Computer	Forschung und Entwicklung
Intel, Santa Clara (Kalifornien) (www.intel.com)	Verbindungen	Forschung und Entwicklung
Motorola, Schaumburg (Illinois) (www.motorola.com)	chemische und biologische Sensoren	Protoypen
Nanomix, Emeryville (Kalifornien) (www.nano.com)	chemische und biologische Sensoren	Produktentwicklung, Forschung und Entwicklung
Nantero, Woburn (Massachusetts) (www.nantero.com)	neue Speichertechnologie	Prototypen
Samsung, Seoul (Südkorea) (www.samsung.com)	Bildschirme	Forschung und Entwicklung
Unidym, Menlo Park (Kalifornien) (www.unidym.com)	gedruckte Elektronik für Bildschirme	Machbarkeitstudie

Vor allem in tragbaren Geräten verspricht das neue Material deutliche Vorteile

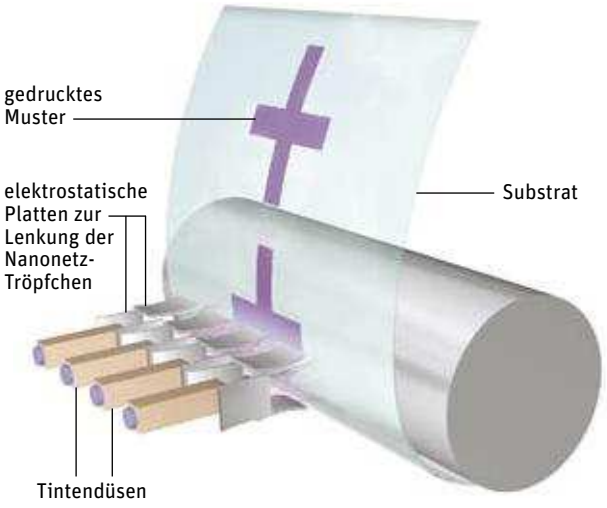
Wie ein Netz gedruckt wird

Derzeit entwickeln Forscher mehrere kostengünstige Methoden, ein vorgegebenes Muster von Nanonetzen – etwa einen elektronischen Schaltkreis – auf eine biegsame Kunststoffoberfläche zu drucken. Das einfachste Verfahren ähnelt einem Stempelvorgang (oben). Ein gemusterter Stempel berührt eine Nanonetzschicht, die teilweise an der untersten Stempelfläche kleben bleibt. Der so präparierte Stempel wird dann auf ein Substrat gepresst und druckt das Nanonetzmuster auf dessen Oberfläche. Für die Massenproduktion kommen zwei Techniken in Frage. Die eine nutzt den üblichen Tintenstrahldrucker, um eine Flüssigkeit mit darin gelösten Nanoröhren auf Substrate zu sprühen (unten links). Die andere Technik ist der Offsetdruck, wobei eine Nanonetz-Lösung an die Stelle der Druckerschwärze tritt (unten rechts).

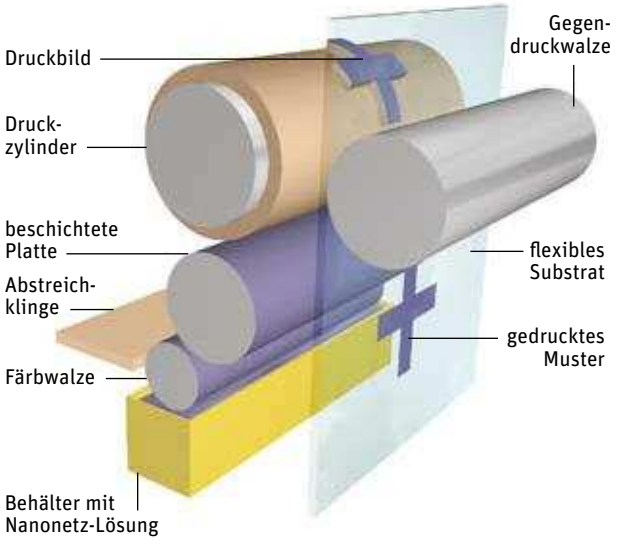
Stempeldruck



Tintenstrahldruck



Offsetdruck



JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

Bauteile wurden auf harten Glassubstraten bei 900 Grad Celsius hergestellt – zu heiß für biegsame Plastiksubstrate, die schon bei 120 Grad schmelzen. Noch im selben Jahr produzierten die Nanomix-Forscher Keith Bradley und Jean-Christophe Gabriel in Zusammenarbeit mit meinem UCLA-Team die ersten biegsamen Nanonetztransistoren auf Kunststoff. Kurz darauf konnten wir gemeinsam mit Roths Gruppe vom Stuttgarter Max-Planck-Institut transparente Bauteile fabrizieren, die sich für tragbare Bildschirme eignen. Dasselbe gelang wenige Monate später auch dem Physiker John Rogers und seinen Kollegen an der Universität von Illinois. Zwar reagierten diese Transistoren sehr schnell – was für solche Geräte am wichtigsten ist –, aber andere Eigenschaften, etwa Funktionieren bei niedriger Spannung, fehlten noch. Das Ziel, die Geräte unterhalb der Spannung gewöhnlicher Batterien zu betreiben, um Strom zu sparen, wurde erst kürzlich von Rogers und dem Chemiker Tobin Marks von der Northwestern University erreicht; sie verwendeten spezielle Polymere, um die leitenden Teile zu isolieren.

In vielen tragbaren Produkten versprechen Kohlenstoff-Nanonetze deutliche Vorteile gegenüber dünnen Schichten aus organischen Metallen, Polymermetallen und manchen

Vermutlich werden halbleitende Nanoröhren schon bald die Alleinherrschaft des Siliziums in der Digitaltechnik brechen

George Gruner ist Physikprofessor an der Universität von Kalifornien in Los Angeles und betreibt Grundlagenforschung im Nanotechnikbereich. Er ist leitender Technologieberater bei Nanomix in Emeryville (Kalifornien) und Gründer von Unidym in Menlo Park (Kalifornien). Beide Firmen entwickeln neue Anwendungen der Nanotechnik.

Carbon nanotube transistors for biosensing applications. Von George Gruner in: Analytical and Bioanalytical Chemistry, Bd. 384, S. 322, 2006

Carbon nanotube films for transparent and flexible electronics. Von George Gruner in: Journal of Materials Chemistry, Bd. 16, S. 3533, 2006

Carbon nanotubes – the route to-ward applications. Von R. H. Baughman, A. A. Zakhidov und W. A. de Heer in: Science, Bd. 297, S. 787, 2002

Weblinks zu diesem Thema:
www.spektrum.de/artikel/903045

Weitere relevante Informationen aus dem Spektrum-Verlag:
www.spektrumdirekt.de/nano

Halbleitern. Für diese Zwecke müssen elektronische Materialien gut leiten, da sie sich sonst erhitzen und Leistung verlieren. Außerdem müssen sie durchsichtig sein, damit der Betrachter eines Bildschirms die darunterliegenden Schichten zu sehen vermag.

Solche Substanzen ermöglichen die Entwicklung von bedruckten makroelektronischen Kunststoffprodukten. Ein Beispiel ist die photovoltaische Zelle. Übliche, aus Silizium-Einkristallen hergestellte Solarzellen sind zwar sehr leistungsfähig – sie wandeln bis zu 18 Prozent des einfallenden Lichts in Strom um –, aber leider auch sperrig, schwer und teuer. Hingegen wäre eine rasiermesserdünne Solarzelle zwar weniger effizient – sie könnte nur 5 bis 6 Prozent des Lichts umwandeln –, aber dafür viel billiger. Durch Massenfertigung großflächiger Systeme würde der geringere Wirkungsgrad ausgeglichen (siehe Kasten auf S. 87).

In der aktiven Mittelschicht einer Solarzelle erzeugt das einfallende Licht Ladungsträger: freie Elektronen und positiv geladene Löcher. Die Elektronen wandern zu einer Elektrode, verrichten elektrische Arbeit und kehren über eine andere Elektrode zu den Löchern zurück, wodurch sich der Stromkreis schließt. Mehrere Firmen arbeiten daran, die aktiven Schichten durch neue Kunststoffsorten oder andere durchsichtige und biegsame Filme zu verbessern. Zusammen mit dem Werkstoffwissenschaftler Michael McGehee von der Stanford-Universität und dem Chemiker Niyazi Serdar Sariciftci von der Universität Linz (Österreich) hat mein UCLA-Team flexible Solarzellen erprobt, deren Nanonetz-Elektroden ähnlich gut funktionieren wie solche aus Indiumzinnoxid.

Nanonetzschichten könnten auch das Herzstück von billigen, biegsamen und leichten Touchscreens bilden. Ein solcher berührungsempfindlicher Bildschirm besteht aus zwei schichtförmigen Elektroden, die durch isolierende Abstandshalter getrennt sind. Wenn ein Finger die obere Schicht an einem Ort berührt, kommen die Elektroden dort in Kontakt und schließen einen diesem Ort zugeordneten Stromkreis, der aus einem auf die untere Schicht gedruckten Muster von Leiterbahnen besteht. Zusammen mit Richard Kaners UCLA-Gruppe hat mein Team Prototypen gebaut und getestet, die auf Nanonetzen beruhen.

Auch in Leuchtdioden funktionieren Nanonetze. Solche Geräte arbeiten wie umgekehrte Solarzellen: Sie erzeugen Licht, wenn zwischen den Elektroden Strom fließt. Mit der Gruppe von Tobin Marks an der Northwestern University hat mein Team kürzlich Leuchtdioden erprobt, die so gut funktionieren, dass sie den Anforderungen von Fernsehgeräten genügen. Den gleichen Erfolg erzielte eine Forschergruppe um Richard Martel von der Universität Montreal (Kanada).

Transistoren aus Nanonetzen lassen sich außerdem in gedruckten Schaltungen verwenden. Zwar zeigen erste Tests, dass die Arbeitsgeschwindigkeit von Kohlenstoff-Nanonetzen etwas hinter der von kristallinem Silizium – dem gängigsten Chipmaterial – hinterherhinkt, aber andererseits sind sie leitfähiger und haltbarer als Polymere. Dünne Schichten aus Nanoröhren eignen sich noch nicht für Notebooks oder Fernseher, doch in vielen anderen Produkten sind sie durchaus konkurrenzfähig – vor allem überall dort, wo ein Material gefordert ist, das zugleich billig, biegsam, leicht, umweltfreundlich und robust ist. Das trifft vor allem auf große Flachbildschirme mit so genannter aktiver Matrix zu. Die Transistoren in einem solchen Bildschirm müssen sehr schnell reagieren, damit der Bildaufbau nicht nachhinkt.

Natürlich brauchen tragbare Geräte Energiequellen, am besten billige, leichte und dünne Wegwerfbatterien oder Akkus. Dabei könnten Nanonetze eine wichtige Rolle spielen – nicht nur als Elektroden, sondern auch als Komponenten mit großer Oberfläche, um elektrische Ladung zu speichern.

Ende der Silizium-Diktatur?

Die Nanonetz-Industrie steckt noch in den Kinderschuhen. Zweifellos werden den hier beschriebenen Machbarkeitsstudien bald funktionsfähige Prototypen und schließlich marktreife Produkte folgen. Heute steht die Industrie ungefähr dort, wo sich die Siliziumchip-Industrie vor einem halben Jahrhundert befand. Den Forschern gelingt es immer besser, Nanoröhren, die so gut leiten wie Metalle, von halbleitenden zu trennen. Unterdessen haben Wissenschaftler ein Verfahren entwickelt, das dem Dotieren von Silizium ähnelt: Spezielle Moleküle werden an die Röhren gebunden, um deren elektrische Eigenschaften gezielt zu verändern. Vermutlich ist es nur noch eine Frage der Zeit, bis solche Schichten in der Digitaltechnik herkömmlichen Metallen Konkurrenz machen und die Alleinherrschaft des Siliziums brechen.

Vor unseren Augen verlassen Nanonetze aus Kohlenstoff den Bereich der Sciencefiction und werden Wirklichkeit. Wie das Silizium wird diese aufblühende Technologie zwar in absehbarer Zeit kaum zu künstlichem Leben führen – aber sie hat gute Aussichten, in nicht allzu ferner Zukunft unseren Alltag durch innovative Produkte zu bereichern. ◁

AUF DEN NÄCHSTEN SEITEN FOLGT EIN SONDERTEIL VON SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT UND VDI NACHRICHTEN ▷

RÄUMLICHE GEOMETRIE

Geordnetes Gestrüpp

Es gibt überraschend viele Möglichkeiten, regelmäßige Vielecke so anzuordnen, dass sie alle ineinanderhängen.

Von Christoph Pöppe

Wenn nach dem Fällen eines Baums die Waldarbeiter die Äste nur notdürftig zersägen und auf einen Haufen werfen, ist es so gut wie unmöglich, aus der Mitte dieses Gestrüpps einen einzelnen Ast herauszuziehen – viele Astkrümmungen und Zweige wirken als Widerhaken. Hersteller anspruchsvollen Holzspielzeugs nutzen dieses Prinzip zur Konstruktion besonders widerspenstigen Gestrüpps: An die Stelle der krummen Äste treten präzise zugeschnittene Holzstäbe mit ebenso präzise ausgesägten Aussparungen. Daraus soll man in geduldiger Arbeit ein Gesamtwerk zusammenfügen, indem man immer wieder Stäbe an der richtigen Stelle in die Aussparungen anderer Stäbe einsetzt und möglicherweise Teile des halb fertigen Werks gegeneinander verschiebt. Das fertige Produkt ist zum Beispiel ein massiver Würfel oder auch ein Gebilde, das einem wild aufgeschichteten Holzstoß im Wald nachempfunden ist. Weil die Stäbe daraus hervorstechen wie die Stacheln einer Klette, heißen sie auf Englisch *burr puzzles* (»Klettenrätsel«).

Die heimtückischsten unter ihnen sind diejenigen, die im fertigen Zustand von allen Seiten gleich aussehen. Dann nämlich ist es völlig unmöglich, einem einzelnen Stab anzusehen, wo er hingehört, und die Anzahl der auszuprobierenden Möglichkeiten wächst ins Uferlose. Wenn ein *burr puzzle* also über viele Symmetrien verfügt, das heißt unter vielen Drehungen im Raum unverändert bleibt – zumindest für den Betrachter von außen –, ist es zugleich hübsch anzusehen und richtig schwer.

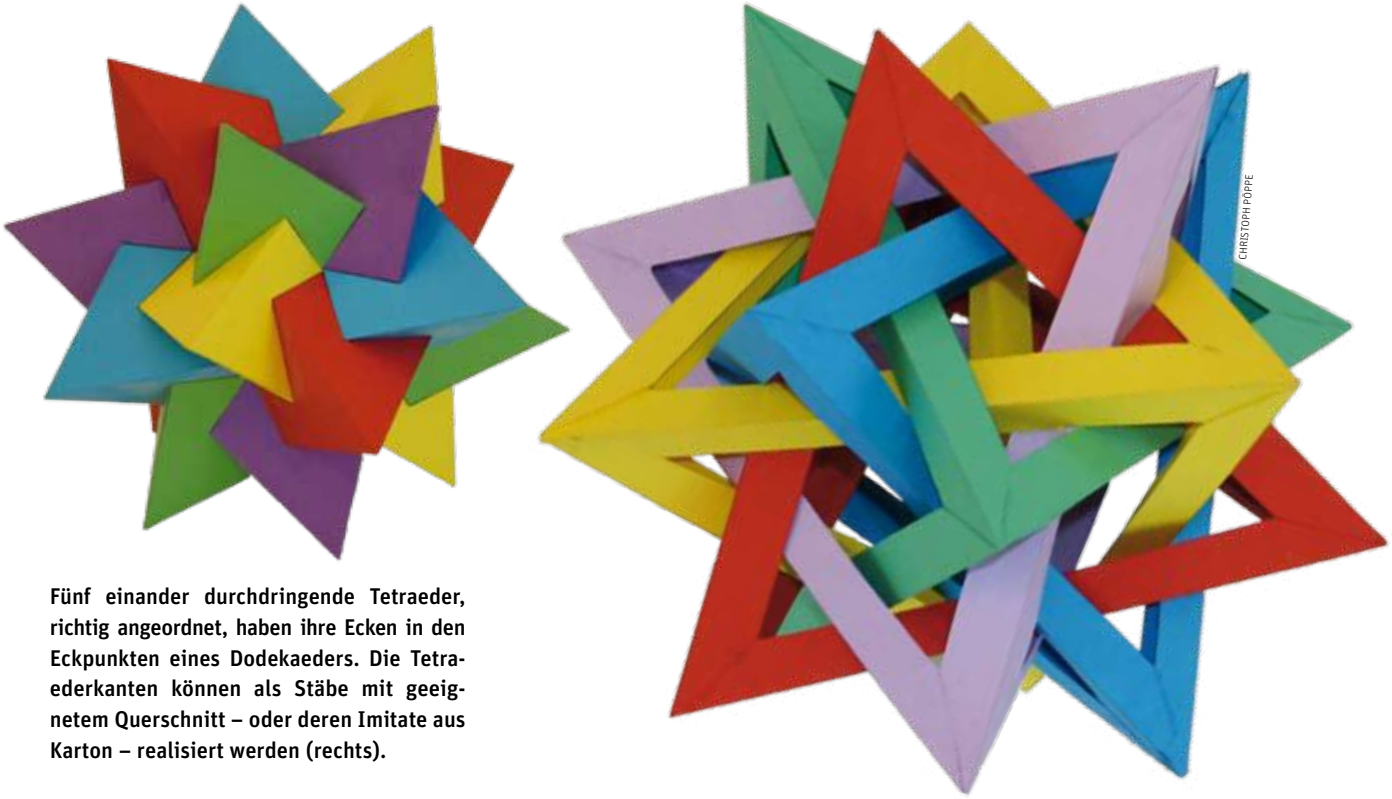
Stets zuverlässige Lieferanten von Symmetrie sind die platonischen Körper, und von einigen langweiligen Ausnahmefällen abgesehen sind sie auch die einzigen. Wenn ein räumliches Gebilde symmetrisch bezüglich Drehungen um mehrere Achsen ist, dann passt es entweder in ein Tetraeder, ein Oktaeder oder ein Ikosaeder, in dem Sinne, dass man das Gebilde durch dieselben Drehungen mit sich zur Deckung bringen kann wie den zugehörigen platonischen Körper. (Die beiden übrigen platonischen Körper Würfel und Dodekaeder bringen nichts Neues, weil ihre Symmetrien gleich denen von Oktaeder beziehungsweise Ikosaeder sind.)

Es wäre daher ein guter Ausgangspunkt für ein *burr puzzle*, zum Beispiel die Ecken eines Dodekaeders so durch Stangen zu verbinden, dass dabei die Symmetrie gewahrt bleibt. Wenn zwei dieser Verbindungslinien sich schneiden, müssen die zugehörigen Stäbe an dieser Stelle ein Paar von Aussparungen haben. Noch interessanter sind jedoch Stab-

Der Holzverhau mit Ikosaedersymmetrie von Stewart Coffin (links) besteht aus dreißig Stäben. Jeweils fünf verschiedenfarbige Stabenden gruppieren sich um einen Eckpunkt des zu Grunde liegenden Ikosaeders. Die Hohlkugel aus 120 Stäben von Philippe Dubois aus Jerusalem (rechts) hält ohne Nägel oder Leim zusammen.

STEWART COFFIN / INDIANA UNIVERSITY

PHILIPPE DUBOIS / INDIANA UNIVERSITY



Fünf einander durchdringende Tetraeder, richtig angeordnet, haben ihre Ecken in den Eckpunkten eines Dodekaeders. Die Tetraederkanten können als Stäbe mit geeignetem Querschnitt – oder deren Imitate aus Karton – realisiert werden (rechts).

werke, die aus einander nicht schneidenden Linien entstehen. Bei ihnen macht man die Stäbe so dick, dass sie sich gegenseitig berühren (Bild S. 93). Wenn die Reibung allein für den festen Zusammenhalt nicht ausreicht, hilft eine geeignete Kombination aus einer Aussparung am einen Stab und einem dazu passenden Auswuchs am anderen.

Eine Weiterentwicklung dieser Ideen kommt aus einer ungewöhnlichen Richtung und von einer sehr ungewöhnlichen Person. Der amerikanische Physiker Robert J. Lang hängte eine erfolgreiche Wissenschaftlerkarriere an den Nagel und machte ein Hobby, das er seit früher Kindheit betreibt, zum Beruf.

Origami, Western Style

In Japan hat die Kunst des Papierfaltens eine 400-jährige Tradition. Nach den überlieferten strengen Regeln des Origami darf man nichts weiter verwenden als ein quadratisches Blatt Papier. Schere und Klebstoff sind ebenso verboten wie irgendwelche zeichnerischen Hilfsmittel. Selbst die Hilfslinien, die einem die Position der nächsten Faltung anzeigen, muss man zuvor gefaltet haben.

Ein derart striktes Reinheitsgebot schränkt die gestalterischen Möglichkeiten stark ein – und liefert damit die Motivation, die als störend empfundenen Schranken zu durchbrechen, kreativ, aber unter Einhaltung der Regeln. In den letzten dreißig Jahren hat Origami, unter maßgeblicher Beteiligung von Robert Lang, einen steilen Aufschwung genommen. Zu seinen gefeierten Werken zählen Hirschkäfer, Elche, Mäuse und andere Tiere mit langen, dünnen Körperteilen, die bislang als unfaltbar galten.

Auf der Suche nach neuen Betätigungsfeldern richtete sich Langs Kreativität auch auf die *burr puzzles*. Die kann man nun beim besten Willen nicht aus einem Blatt Papier falten. Aber eine einzelne Stange ist für einen Origamisten eine der leichtesten Übungen, und mehrere gleiche Blätter statt eines einzigen zu verwenden gilt noch als einigermaßen regelgetreu. Lang nimmt darüber hinaus manchmal statt der traditionellen quadratischen Blätter Dollarscheine; die haben ein günstigeres Seitenverhältnis und ergeben Werke von bleibendem Wert (von der Inflation einmal abgesehen).

Aussparungen und Auswüchse sind beim Origami zwar machbar, aber lästig. So versuchte Lang, aus schlichten, geraden Dollarstangen ein Gestrüpp herzustellen, dessen dreißig Stangen abwechselnd über- und untereinanderliegen und sich deswegen eigentlich gegenseitig beklemmen müssten (wie im Bild S. 93 links) – und scheiterte kläglich. Etwas mehr musste er seine Papierstangen in ihrer Beweglichkeit wohl doch einschränken.

Die gute Idee dazu kam ihm wenig später: Man lege die Stangen so, dass sie an ihren Enden miteinander verbunden sind. Für ein *burr puzzle* ist das entstehende Gestrüpp dann zwar nicht geeignet, fürs Papierfalten dagegen sehr. Die Origami-Meister können nämlich ihre Stangen mit Laschen und Taschen versehen, sodass eine Lasche des einen Teils in eine Tasche des anderen passt und sich das ganze Gebilde bequem zusammenstecken lässt.

Damit entsteht unversehens eine neue mathematische Aufgabe: Man lege lauter gleiche Stangen in den Raum, die durch Symmetrietransformationen des Tetraeders, des Oktaeders oder des Ikosaeders ineinander übergehen, an ihren Enden aufeinandertreffen und sich im Übrigen nicht schneiden.

Hat man eine solche Anordnung gefunden, folgt die nächste Aufgabe gleich auf dem Fuß: Man verdicke die – theoretisch zunächst unendlich dünnen – Stangen so, dass sie sich gegenseitig beklemmen. Lang stellte sich an Stelle der Stangen lange dünne Luftballons vor, die langsam und gleichmäßig aufgeblasen werden. Irgendwann geraten sie miteinander in Kontakt und bilden dort eine ebene Grenzfläche aus. Diese Fläche, beliebig ausgedehnt, soll Grenzfläche des Stabs auf seiner ganzen Länge sein; und da der Stab mit mehreren Nachbarn auf allen Seiten in dieser Weise in Kontakt gerät, ist sein Querschnitt damit vollständig bestimmt.

Geometrisch ist diese Konstruktion folgendermaßen nachzuvollziehen: Man bestimme zu einem Stab die kürzeste Verbindungsstrecke zu jedem anderen Stab – ausgenommen die Stäbe, die an einem Ende an ihn angrenzen. Die »Mittelsenk-

rechte« dieser Verbindungsstrecke, das heißt die Ebene, die auf der Strecke in deren Mittelpunkt senkrecht steht, ist die gesuchte Grenzfläche. Damit ist auch die Form der Stangen bestimmt.

Eine Lösung der ersten Aufgabe besteht darin, die Eckpunkte eines Dodekaeders so zu verbinden, dass fünf einander durchdringende Tetraeder dabei entstehen. Das geht auf zwei spiegelbildlich verschiedene Arten und sieht recht hübsch aus (Bilder links). Nur hatte Langs Künstlerkollege Thomas Hull dieselbe Idee auch schon gehabt und unter dem Kürzel FIT (»five intersecting tetrahedra«) bekanntgemacht.

Auf der Suche nach weiteren Lösungen besann sich Lang seiner wissenschaftlichen Vergangenheit und formulierte ein möglichst allgemeines Verfahren. Man nehme einen platonischen Körper und baue in ihn eine Achse ein, die durch den Mittelpunkt des Körpers und den Mittelpunkt einer seiner Kanten verläuft. Um diese Achse drehe man besagte Kante (die »Referenzkante«), die man sich zugleich beliebig lang vorstellen möge. Der Symmetrie zuliebe verfahre man in gleicher Weise mit allen anderen Kanten. Während der Drehung wird die verlängerte Kante irgendwann eine andere schneiden. Wegen der Symmetrie widerfährt das im selben Augenblick auch allen anderen Kanten, und schon ist ein neues Stabwerk entstanden.

Systematik der symmetrischen Holzstöße

Dabei treffen sich im Allgemeinen jeweils zwei Kanten in einem Punkt und nicht drei wie beim Tetraederfünfling. Die Kanten fügen sich also nicht zu räumlichen Gebilden, sondern zu ebenen Vielecken – regelmäßigen Vielecken, etwas anderes ist mit der Symmetrie nicht vereinbar. Meistens durchdringen diese Vielecke einander und bilden damit Stabwerke von ganz besonderem Reiz (Bilder rechts). Es ist mit dem Auge nicht einfach nachzuvollziehen, wie diese Stangenvielecke miteinander verknotet sind. »Orderly Tangles« (»geordnete Gestrüppe«) hat der Chemiker Alan Holden sein Buch betitelt, in dem er einige dieser Stabwerke, aus Rundhölzern gefertigt, abbildet und beschreibt.

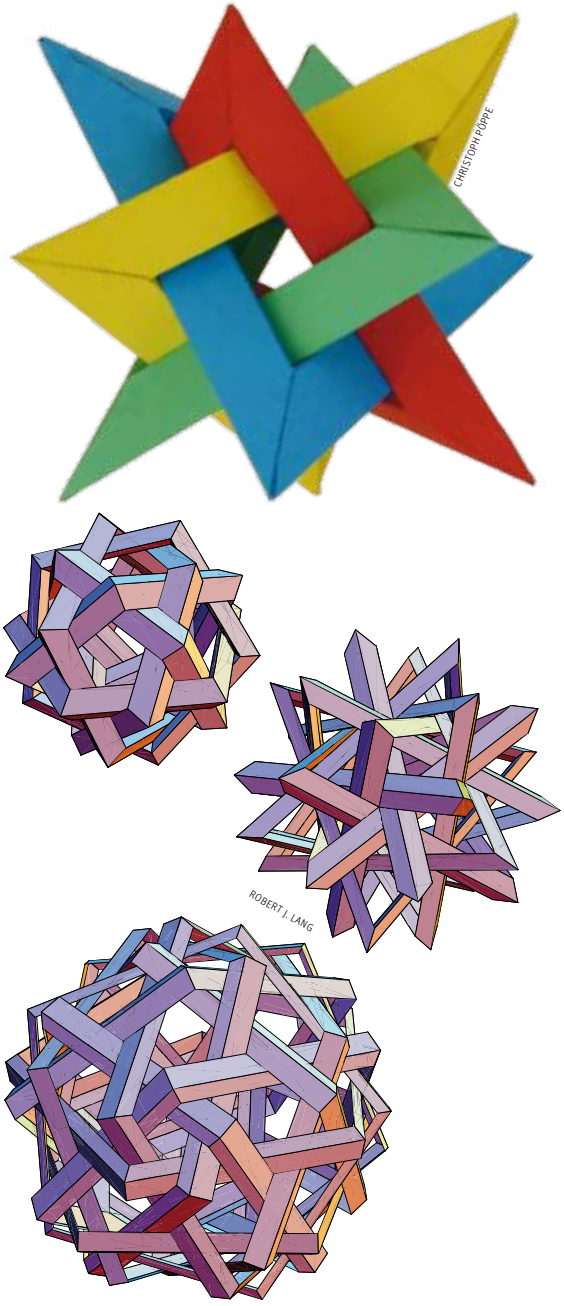
Damit nicht genug. Lang erkannte, dass sein Kantendrehverfahren zwar ergiebig, aber alles andere als erschöpfend ist. Insbesondere kann es den »Klassiker«, den Tetraederfünfling, nicht reproduzieren. Also erlaubte er im Streben nach mathematischer Allgemeinheit den Endpunkten seiner Referenzkante, irgendwo zu liegen. Durch Anwendung der Symmetrietransformationen entstehen aus der einen Kante viele; Lang berechnete in einer vollständigen Fallunterscheidung alle derartigen Kantenensembles.

Dabei kommt es darauf an, ob ein solcher Endpunkt durch eine Symmetrietransformation auf sich selbst abgebildet werden kann, und wenn ja, durch welche. Bei den platonischen Körpern selbst sind diese speziellen Punkte die Ecken, die Mittelpunkte der Flächen und die Mittelpunkte der Kanten.

Mit einer langen Suche, die durch die Mathematik-Software »Mathematica« erst in den Bereich des Machbaren geriet, fand Lang ein reichhaltiges Sortiment von »Polypolyedern«, wie er sie nennt. Es gibt vier eindeutig bestimmte, bei denen beide Ecken der Referenzkante aus derselben Klasse spezieller Punkte stammen, und neun etwas weniger eindeutig bestimmte (ein Parameter ist noch frei), bei denen sie aus verschiedenen Klassen sind. Oder beide Ecken sind nicht speziell, in welchem Fall es weitere 28 Möglichkeiten gibt. Da hier jeweils noch zwei weitere Parameter variabel sind, gehören zu jedem der 28 Typen mehrere verschiedene Polypolyeder, die sich zwar nicht in ihren Bestandteilen, aber in deren Anordnung unterscheiden. Andererseits stellen sich ein paar verschiedene Darstellungen nachträglich als äquivalent heraus.

Am Ende steht eine Liste von 54 wesentlich verschiedenen Polypolyedern. Fast die Hälfte von ihnen besteht aus zwanzig Dreiecken. Da haben die Origamisten einiges zu falten.

Aber obgleich die Beschränkungen der japanischen Falttechnik den Anlass zu Langs groß angelegter Untersuchung gegeben haben, sind die Ergebnisse natürlich nicht auf Origami beschränkt. Diese merkwürdig ineinander verknoteten Vielecke darf man aus jedem Material herstellen. ◁



Wie sich Balken zu miteinander verknoteten Vielecken fügen: oben vier Dreiecke mit den Ecken in den Kantenmittelpunkten eines Würfels; darunter sechs Fünfecke, zehn Dreiecke und zwölf Fünfecke. Diese drei von Robert Lang mit »Mathematica« berechneten Polypolyeder haben sämtlich die Symmetrie des Ikosaeders.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Marvelous Modular Origami. Von Meenakshi Mukerji. A K Peters, Wellesley (Massachusetts) 2007

A Plethora of Polyhedra in Origami. Von John Montroll. Dover, New York 2002

Origami3. Proceedings of the 3rd International Meeting of Origami Science, Math, and Education. Von Thomas Hull (Hg.). A K Peters, Wellesley (Massachusetts) 2002

Orderly Tangles. Cloverleafs, Gordian Knots, and Regular Polylinks. Von Alan Holden. Columbia University Press, New York 1983

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/903049.

Das vergessene Reich der Jinsha

Jadefiguren, Stoßzähne, Bronzen und Goldschmuck – chinesische Archäologen entdeckten eine reiche Kultur an einem Ort, wo niemand dergleichen vermutet hätte.

SINOPICTURES / READFOTO / JINSHA-MUSEUM

Von Mayke Wagner und Pavel Tarasov

Die chinesischen Gelehrten der Antike waren eifrige Schreiber. Ab dem 3. Jahrhundert v. Chr. protokollierten sie die Entwicklung des Kaiserreichs so penibel, dass heute kaum eine Frage zu dessen Geschichte unbeantwortet bleibt. Zudem schrieben sie nieder, was an vorangegangenen Ereignissen aus der Zeit der legendären Drei Dynastien Xia, Shang und Zhou mündlich überliefert war, sodass Historiker über Quellen verfügen, die bis etwa in das 21. Jahrhundert v. Chr. zurückreichen.

Dass diese verlässlich sind, bestätigte schon die erste wissenschaftliche Großgrabung 1928: Anhand alter Chroniken entdeckten Forscher Yin, die letzte Hauptstadt der Shang-Dynastie (etwa vom 16. vorchristlichen Jahrhundert bis

SINOPICTURES / READFOTO / JINSHA-MUSEUM

Meisterhafte Kunstwerke kamen bei Grabungen in der Provinz Sichuan ans Licht, darunter eine Maske aus Goldblech (oben) und ein Jadetiger (links). Während Erstere nur etwa fünf Gramm wiegt und fünf Zentimeter breit ist, bringt die 28,4 Zentimeter lange Skulptur 5,5 Kilogramm auf die Waage.

1046 v. Chr.). Diese Könige beherrschten weite Teile der ostchinesischen Tiefebene, wobei das Ufer des mittleren Chang Jiang, des »Langen Flusses« (heute Yangzi), die Südgrenze ihres Reichs bildete (siehe Karte S. 99). Die archäologische Erkundung der chinesischen Geschichte beginnt deshalb auch heute mit dem Studium der antiken Schriften. Forscher leiten daraus Hypothesen ab, die sie mit dem Spaten überprüfen. Ein bewährtes Verfahren – jedenfalls für das Kernland des alten Reichs.

Doch weder Überlieferungen aus der Zeit der Drei Dynastien noch Inschriften jener Reiche nennen die Namen von Herrschern und Residenzen der Nachbarregionen. Dieses Desinteresse offenbart ein elitäres Selbstverständnis: Am Chang Jiang und im Norden am Huang He, dem »Gelben Fluss«, endet die zivilisierte Welt, ringsumher gibt es nur eine von kulturlosen Barbaren bevölkerte Wildnis. Erst mit der Expansion der Han-Dynastie (206 v. Chr.–220 n. Chr.) über die Grenzen des Kernlands hinaus fanden diese Gebiete aus pragmatischem Interesse Eingang in die Chroniken.

Diese Nichtbeachtung prägte lange auch das Bild, das sich Archäologen von jenen Regionen machten: Dort waren offenbar lediglich die Hinterlassenschaften sehr einfacher Kulturen zu erwarten. Erst seit etwa zwanzig Jahren überschreiten Forscher die Grenzen der antiken Geschichtsschreibung und entdecken immer wieder die Spuren hoch entwickelter Gesellschaften. Zu den größten Überraschungen gehört wohl der Fundplatz Jinsha (ausgesprochen: Djinscha) im Becken von Sichuan in Chengdu, der bei Bauarbeiten im Jahr 2001 entdeckt wurde.

Sichuan (auch Szetschuan) ist mit etwa 107 Millionen Einwohnern heute die bevölke-

In Kürze

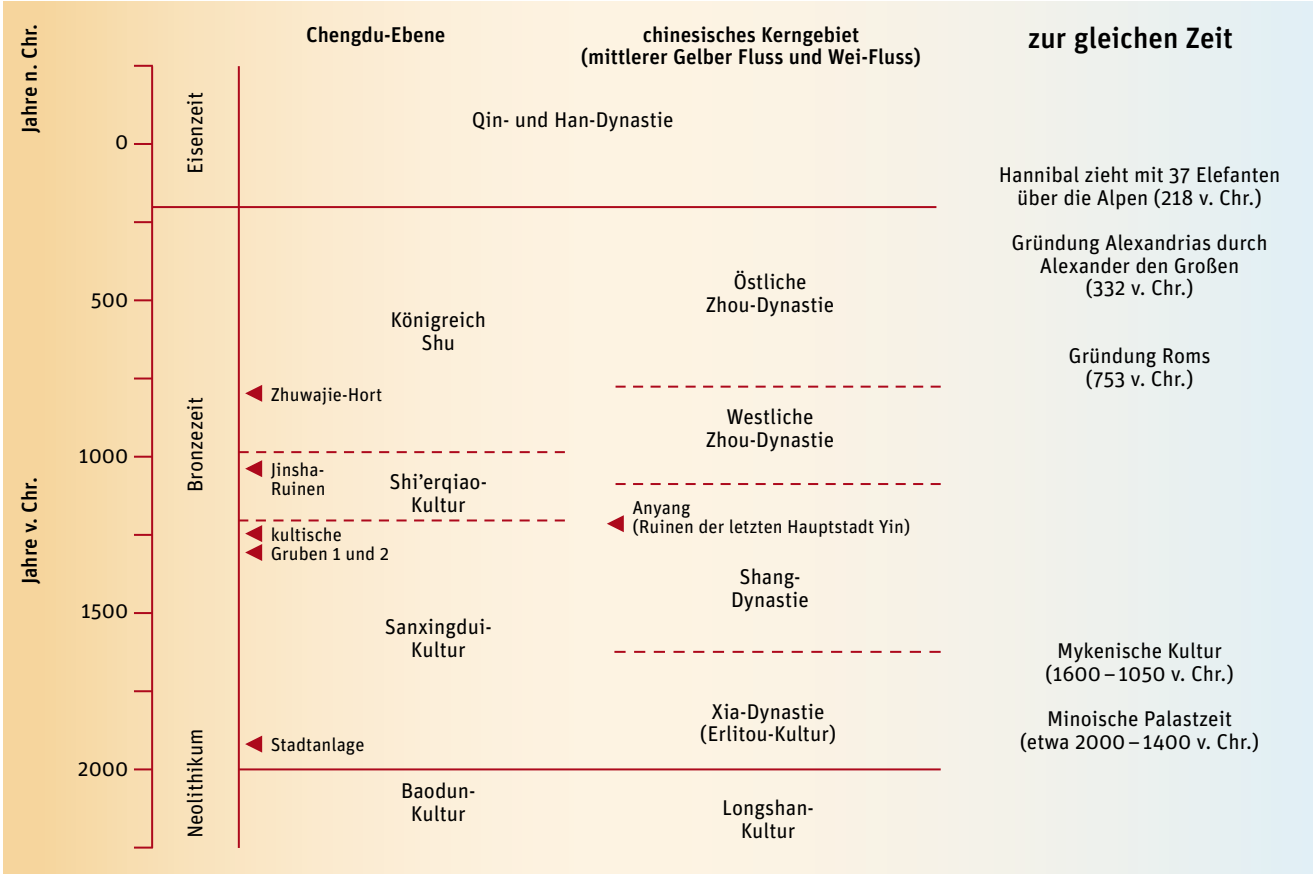
- In Jinsha, einem Stadtteil Chengdus (Provinz Sichuan), entdeckten Archäologen **kostbare Jade-, Gold- und Bronzeobjekte,** Kultstätten und Siedlungen, die auf eine bislang unbekannte hochentwickelte Kultur des 1. Jahrtausends v. Chr. hinweisen.
- Überraschend daran war vor allem, dass **antike chinesische Texte** diese Kultur nicht erwähnt hatten, obwohl Handelskontakte archäologisch nachgewiesen sind.

rungsreichste und bei weniger als 570 000 Quadratkilometern auch die am dichtesten besiedelte Provinz der Volksrepublik. Sie wird vom Chang Jiang und seinen Zuflüssen durchzogen. In der so genannten Zeit der »Streitenden Reiche« (475 – 221 v. Chr.) lebten dort die Shu. Sie wurden 316 v. Chr. von ihren Nachbarn, den Qin, besiegt. Diese eroberten ein Land nach dem anderen, bis sich der König von Qin 221 v. Chr. zum ersten Kaiser ausrufen ließ; die Bezeichnung »China« leitet sich möglicherweise vom Namen seiner Dynastie her, doch das ist in der Fachwelt umstritten. Heutzutage kennt man diesen ersten Potentaten in Europa und Amerika vor allem dank der lebensgroßen Tonsoldaten, die seinen unterirdischen Grabpalast bewachten. Wie andere Völker wurden die Shu völlig assimiliert: Sie verloren ihre kulturelle Identität, selbst die eigene Sprache.

Ihre Hauptstadt Chengdu beeindruckte Archäologen dementsprechend bis vor Kurzem nur durch technische und kulturelle Leistungen aus der Kaiserzeit: Vom tibetischen Hochplateau kommende Flüsse wurden bald nach der Eroberung durch einen Damm reguliert und in ein verzweigtes Kanalsystem geleitet, das die Bewässerungsanlagen der fruchtbaren Ebene versorgte. An Steinfiguren an seinem Eingang ließ sich die Wasserhöhe ablesen, bei Wartungsarbeiten gaben Flusspferdfiguren die Tiefe des Betts vor. Noch heute ist diese Anlage, die im Unesco-Weltkulturerbe aufgenommen wurde, voll funktionsfähig. Ohne Zweifel gedieh die Stadt unter chinesischer Herrschaft. So entwickelte sie sich zu einem bedeutenden Zentrum der Seidenbrokatweberei des 3. Jahrhunderts n. Chr.; zudem stellte sie im Jahr 1023 ihre Innovationskraft unter Beweis, als dort die ersten staatlichen Banknoten der Welt ausgegeben wurden. Mit der ursprünglichen Bevölkerung aber, den Shu und ihren Vorläufern, schien all das wenig zu tun zu haben.

Kunst aus Gold, Bronze und Jade

Doch am 8. Februar 2001 förderten Arbeiter beim Bau eines Autobahnkreuzes in Chengdus Vorstadt Jinsha – zu Deutsch »Goldsand« – Elefantenstoßzähne und Jadestücke ans Licht. Für die Stadtarchäologen begann eine spannende Zeit. Sie bargen mehr als eine Tonne Elfenbein, was allein schon eine Sensation gewesen wäre, darüber hinaus aber auch Kunstwerke aus Gold, Bronze und Stein. Insbesondere etwa 900 hochwertige Jadeobjekte – Waffen, Zepter und andere Meisterstücke, die allein dem Prunk und der Repräsentation dienten – übertrafen alles bisher Bekannte. Am meisten überraschte jedoch das Alter dieser Funde: Sie stammen aus der Zeit um 1000 v. Chr.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Bauarbeiten wurden nie wieder aufgenommen, das geplante Autobahnkreuz verlegt. Stattdessen erschlossen die Wissenschaftler nun Jahr um Jahr mehrere tausend Quadratmeter alter Siedlungsfläche. Noch sind die Ausgrabungen nicht beendet, doch schon jetzt zeichnet sich die Komplexität einer Gesellschaft ab, die lange vor den Shu auf dem Territorium des heutigen Chengdu florierte und von der die Drei Dynastien entweder keine Kenntnis hatten oder die sie ignorierten.

Das gesamte bewohnte Areal hatte nach heutiger Kenntnis eine Größe von etwa fünf Quadratkilometern und wurde vom Modi, einem Nebenfluss des Chang Jiang, durchflossen. Im Süden des Gebiets entdeckten die Ausgräber viele Erdgruben, in denen Elefantenstoßzähne, Bronzen und Jaden offenbar rituell deponiert worden waren. Auch zahllose steinerne Ringscheiben sowie zerbrochene Wildschweinzähne und Hirschgeweihe lassen dort ein Kultzentrum vermuten. Nur dreißig Meter entfernt lag einst ein Wohngebiet, wie Gebäudespuren – vor allem Pfostenlöcher und Bodenverfärbungen –, Vorrats- und Abfallgruben, Unmengen von Scherben und ein Keramikofen annehmen lassen. Unweit davon wiederum gab es einen Friedhof; vermutlich entstand er erst, als die Stadt wuchs und einzelne Viertel neue Funktionen erhielten.

Vögel waren beliebte Motive in Sanxingdui. Sie saßen auf den Zweigen geweihter Bäume, auf Stangen und Glöckchen. Vermutlich waren sie Symbole eines Sonnenkults.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

BEIDE FOTOS: SINOPICTURES / READFOTO / SANXINGDUI-MUSEUM

Elefantenstoßzähne fanden Archäologen in Sanxingdui (oben) und Jinsha. Die Tiere genossen im späten 2. und frühen 1. Jahrtausend v. Chr. im Chengdu-Becken kultische Verehrung. Zeitgleich zu Sanxingdui existierte das Reich der Shang, parallel zu Jinsha das der Zhou.

FOTOS DIESER DOPPELSEITE: SINOPICTURES / READFOTO / JINSHA-MUSEUM

Die sozialen Extreme der Gesellschaft um 1000 v. Chr. verdeutlichen diese Jinsha-Plastiken: Auf der Linken ein elegant gekleideter Adliger aus Bronze mit Strahlenkranz und Zepter (19,6 Zentimeter hoch); die steinere Figur zeigt einen nackten Gefangenen (21,7 Zentimeter).

Diese erstaunlichen Funde warfen auch ein neues Licht auf mehrräumige Langhäuser, die nördlich des Modi in mehreren Kampagnen seit 1995 ausgegraben wurden. Die Experten deuten sie nun als Palastanlagen, die zur Siedlung gehörten. Die größte – etwa 55 mal 8 Meter – bestand aus fünf nebeneinanderliegenden Räumen, zu denen jeweils eine Tür von außen führte. Mit seinen Palast-, Ritual-, Wohn- und Bestattungsvierteln erweist sich Jinsha damit als urbanes Zentrum, den Keramikfunden nach gehörte es zu der bislang kaum bekannten Shi'erqiao-Kultur.

Zu welchen Meisterleistungen diese Menschen fähig waren, davon legen kunstvolle Objekte beredtes Zeugnis ab. Das bekannteste, sozusagen das Markenzeichen Jinshas, dürfte eine goldene Sonnenvogel-Scheibe sein: Vier Wasservögel mit langen Hälsen und Beinen umrunden einen Wirbel aus zwölf Strahlen (siehe Bild rechts). Obwohl diese Kultur nicht zum antiken China gehörte, nahm das Raumschiff »Shenzhou VI« am 12. Oktober 2005 ein Bild der Scheibe als Symbol des Alten China mit ins All, seit 2005 ist es das Signet geschützter archäologischer Objekte.

Einen solchen Strahlenkranz trägt auch die Bronzefigur eines Noblen, ein weiteres Kunstwerk aus Jinsha (siehe Bild links). Feinste Jade hingegen nutzten die Handwerker für sein Zepter wie auch für Elemente seines Gewands. Nicht nur über die Kleidung der Elite jener Kultur geben Statuen Aufschluss, sondern auch über die Haartracht: Lange geflochtene Zöpfe schienen Mode gewesen zu sein, mitunter auch ein »Irokesenschnitt« – eine voluminöse Haarpracht am Scheitel über einem ansonsten geschorenen Schädel (siehe

Nur zwei Millimeter dick ist die Sonnenvogel-Scheibe aus Jinsha (Durchmesser 12,5 Zentimeter). Ein roter Lackgrund steigerte vermutlich die dramatische Wirkung. Sonnenrad und vier Vögel wurden mit Hilfe einer Schablone ausgeschnitten.

mittleres Bild). Andere beindruckende Beispiele der Steinmetzkunst sind Tierfiguren, die einen hohen Abstraktionsgrad und die gekonnte Nutzung der natürlichen Maserung des Steins zeigen (siehe Bild S. 96).

Eine kleine Goldmaske (siehe Bild S. 97) verbindet Jinsha mit einem ebenfalls berühmten Fundkomplex: Bereits 1986 hatte man bei einem Dorf etwa vierzig Kilometer nördlich von Chengdu zwei Erdgruben voller Bronzemasken und Fragmente von Skulpturen entdeckt. Zwei Bronzeköpfe trugen Goldauflagen, bei denen die Augenpartie ausgespart wurde – wie bei der Goldmaske aus Jinsha. Dieser Fundplatz Sanxingdui – zu Deutsch »Drei-Sterne-Hügel« – ist eine der rätselhaftesten prähistorischen Stätten Chinas. Seine Anfänge reichen möglicherweise bis zur jungsteinzeitlichen Baodun-Kultur zurück, die von etwa 2500 bis 2000 v. Chr. dort blühte und ähnliche Keramiken fertigte.

Allerdings genießen andere Funde weit mehr Popularität. Die Statue eines Manns etwa, der auf einem Sockel aus Elefantenschädeln steht (siehe Bild S. 102), bereiste als Exponat schon die ganze Welt. Der Kölner Kunsthistoriker und Ostasien-Experte Roger Goepper fasste 1995 für deutsche Leser alle gängigen Interpretationen dieser Figur zusammen: höchster Schamane oder Priester des Reichs, vergöttlichter König, in Ritualen verwandter Stellvertreter eines Gottes oder Ahnen. Da bis heute keine schriftlichen Aufzeichnungen in Sanxingdui entdeckt wurden, bleiben solche Deutungen leider unbestätigt.

Sicher ist nur, dass die beiden Gruben etwa zwischen 1300 und 1000 v. Chr. angelegt und verfüllt wurden. Die Stadtanlage, in deren

Chinas langer Weg

- **Als Xia** bezeichnen Chroniken Chinas erste Königsdynastie (tradiert: 21. – 16. Jahrhundert v. Chr.). Ob sie mit der archäologisch nachweisbaren Erlitou-Kultur identisch ist oder ins Reich der Mythen gehört, ist umstritten.
- **Die Shang** (etwa 1600 – 1046 v. Chr.) waren erfolgreiche Kriegsherren. Ihre letzte Hauptstadt, Yin nahe dem heutigen Anyang, wird seit 1928 ausgegraben und ist durch ihre Königsgräber bekannt geworden.
- **Die Zhou** waren als Vasallen der Shang erstarkt und errangen um 1046 v. Chr. die Macht. 771 v. Chr. wurde ihre Hauptstadt nahe des heutigen X'ian zerstört, die Zhou wichen nach Osten aus und verloren an Einfluss.
- **Die Streitenden Reiche** (475 – 221 v. Chr.) waren rivalisierende Kleinstaaten des einstigen Zhou-Reichs, der **König von Quin** ging aus den Kämpfen als Sieger und **erster Kaiser** hervor.

SINOPICTURES / READFOTO / SANXINGDUI-MUSEUM

Schamane, Priester, König oder gar Gott? Diese Statue eines Mannes auf stilisierten Elefantenschädeln (262 Zentimeter hoch, 180 Kilogramm schwer), gefunden in Grube 2 von Sanxingdui, reiste als Exponat schon um die ganze Welt. Seine Deutung ist bis heute umstritten.

Mauern sie sich fanden, geht sogar auf eine Gründung um 2000 v. Chr. zurück (siehe Zeittafel S. 98) und wurde damit fast tausend Jahre lang bewohnt. Jinsha, so vermuten die chinesischen Wissenschaftler nun, trat die Nachfolge Sanxingduis an. Denn in beiden Städten genossen Elefanten offenbar große Wertschätzung.

Das mag zunächst verwundern, denn im heutigen China findet man wild lebende Vertreter nur noch in Urwäldern an der Grenze zu Burma. Diese Dickhäuter gehören zur Art der Asiatischen Elefanten *(Elephans maximus)*, die vom Aussterben bedroht ist. Sie bewohnen Bergwälder bis zu 3000 Meter Höhe und stoßen im Himalaja sogar bis zur Schneegrenze vor. Wirklich zu Hause sind sie aber im Gras- und Bambusdickicht wärmerer Zonen, wie sie einst in der Chengdu-Ebene und auf den Hängen der nahen Berge gediehen. Wurde es im Sommer in der Ebene über 25 Grad Celsius heiß, zogen sie in die höher gelegenen Regenwälder, während sie den Winter bei 5 bis 6 Grad in den Sumpfwäldern des Flachlands verbrachten. Noch lange nachdem der Mensch den Lebensraum der Elefanten durch die Feldwirtschaft zerstört hatte, hielt er sie als Nutztiere. Als Chengdu beispielsweise Anfang der 1370er Jahre von den Truppen der Ming-Dynastie-Gründer angegriffen wurde, setzten die Verteidiger Kriegselefanten ein. Erst mit dem Aufkommen der Feuerwaffen war ihre Zeit endgültig vorbei.

Elefantengott von Jinsha

Welchen Stellenwert die Dickhäuter in Jinsha und Sanxingdui hatten, ob man sie als Lastenträger oder für den Kampfeinsatz schätzte, weiß niemand zu sagen. Dass ihnen aber eine symbolische Bedeutung zukam, das zeigen diverse Funde. So hielt der Mann von Sanxingdui einst wohl einen Stoßzahn in Händen. Das jedenfalls lässt ein in Jinsha entdecktes Goldblech vermuten, das ein ebensolches Bild trägt. Zwar waren die Hände der Statue bei ihrer Entdeckung leer, doch in der Fundgrube lagen etwa sechzig unbearbeitete Elefantenstoßzähne.

Noch deutlicher verweist eine kleinere Skulptur aus derselben Grabung auf den religiösen Kontext: Elefantenrüssel und -ohren zieren ihren Kopfputz (siehe Bild rechts). Auch riesige Bronzemasken tragen solche »Insignien«. Aus all diesen Hinweisen lässt sich folgendes Bild zeichnen: Die Priester beziehungsweise Schamanen von Jinsha und Sanxingdui schmückten sich in ihren Ritualen mit Elefantensymbolen und boten ihren Ahnen oder Göttern Stoßzähne als Opfer dar, die sie dazu in Gruben – mit den Spitzen nach Süden ausgerichtet – deponierten. Hy-

pothetisch ist aber diese Deutung der majestätischen Masken: Elefant und Mensch verschmolzen darin zum Antlitz eines mythischen Stammvaters der Menschen oder der Elefanten, vielleicht auch zu dem eines Elefantengotts, der das Elfenbein als Dank für die Dienste seiner Geschöpfe zurückerhielt. Anscheinend wurde dieser edle Werkstoff aber von den Chengdu-Menschen niemals verarbeitet, vielleicht war dies ein Tabu.

Wenn Jinsha und Sanxingdui auch diesen Kult gemein hatten, so gab es doch wesentliche Unterschiede, die als Entwicklung gedeutet werden. Zum Beispiel ist die Anzahl der in Jinsha ausgegrabenen Stoßzähne erheblich größer, und das, obwohl die ältere Stadt bereits seit zwanzig Jahren archäologisch erforscht wird. Andererseits sind die Skulpturen Jinshas sehr viel kleiner und konnten sicherlich keine echten Stoßzähne in Händen halten. Und noch eine Veränderung gab es: Himmelssymbole wie Sonne und Vogel gewannen offenbar an Bedeutung.

Doch warum wurde Sanxingdui überhaupt aufgegeben und eine neue Stadt vierzig Kilometer südlich errichtet? Darüber lässt sich natürlich nur mutmaßen. Vielleicht entsprach die Neugründung einer religiösen Neuausrichtung auf die Kräfte des Himmels, möglicherweise war sie politisch motiviert und erfolgte im Rahmen einer Reichsgründung, ebenso lassen sich veränderte ökonomische Rahmenbedingungen als Triebkräfte denken. Zustand und Fundkontext der offenbar religiösen Objekte von Sanxingdui sprechen jedenfalls dafür, dass der Umzug planmäßig erfolgte: Statuen, Masken und anderes wurden in Ritualen zerstört und beigesetzt, der Tempel und der Altar dort nach Ansicht der Archäologen abgetragen.

In der Gesamtschau zeigt sich Jinsha damit als Hauptstadt eines Reichs, das um 1000 v. Chr. im heutigen Sichuan existiert hat. Seine Wurzeln reichen über Sanxingdui bis zur Baodun-Kultur im 3. Jahrtausend v. Chr zurück. Formale Übereinstimmungen der Hinterlassenschaften sprechen auch für eine Kontinuität mit dem Königreich Shu, das in der zweiten Hälfte des 1. Jahrtausends v. Chr. von Chengdu aus die Region beherrschte.

Zur gleichen Zeit hatten sich auch die Drei Dynastien entwickelt, doch über die Nachbarn schweigen ihre Texte. Dabei kannte man sich durchaus, wie Archäologen bewiesen haben. So kamen in Sanxingdui Bronzegefäße im »Shang-Stil« zum Vorschein. Die Shang waren die zweite in den alten Chroniken aufgeführte Herrscherfamilie Chinas (siehe »Chinas langer Weg«, linke Randspalte). Zu ihrem Reich gehörten ab etwa 1300 v. Chr. auch jene Minen, aus denen das Kupfer stammte, das, so die Metallurgen, in der Bronze der Sanxingdui-Masken eingesetzt wurde. Hortfunde wie die von Zhuwajia und Grabfunde unweit von Jinsha belegen zudem Kontakte mit dem nachfolgenden Zhou-Reich. Deren Stammland lag nur 600 Kilometer entfernt, und einige Experten glauben, dass mancher Eroberungszug der äußerst expansiven Zhou nicht nur mit Duldung, sondern mit aktiver Unterstützung der Herren von Jinsha erfolgte. Auch über solche Nord-Süd-Allianzen schweigen die Textquellen.

Vermutlich hält die Chengdu-Ebene noch so manche Überraschung bereit, verborgen unter der üppig wuchernden Vegetation. Wo immer eine Ausgrabung abgeschlossen wird, kann man dem Bambus regelrecht beim Wachsen zuschauen. Die heutige Stadt Chengdu schützt die Fundstätte Jinsha deshalb seit diesem Jahr mit einem ungewöhnlichen Museum: Eine gewaltige Halle über einem Abschnitt der Ausgrabung konserviert Bodenprofile, aus alten Flusssedimenten herauspräparierte Baumstämme sowie Goldfunde. Die Magie des Platzes hat bereits chinesische Komponisten inspiriert: In der »Jinsha-Oper« gelingt dem Chefarchäologen nach dramatischer Suche die große Entdeckung. ◁

SINOPICTURES / READFOTO / SANXINGDUI-MUSEUM

Auch diese Bronzemaske aus Grube 2 von Sanxingdui verweist auf den Elefantenkult: Ein über der Nase angebrachter Rüssel und »Elefantenohren« schmücken den Kopfputz (Gesamthöhe 82,6 Zentimeter, Gewicht 17 Kilogramm).

Mayke Wagner ist Stellvertretende Leiterin der Eurasien-Abteilung des Deutschen Archäologischen Instituts Berlin. Sie lehrt Chinesische Archäologie in Würzburg und Zürich. Der Geowissenschaftler **Pavel Tarasov** betreibt Paläoklimaforschung in China und lehrt an der Freien Universität Berlin.

Das Alte China: Menschen und Götter im Reich der Mitte 5000 v. Chr. – 220 n. Chr. Kulturstiftung Ruhr, Essen. Hirmer-Verlag, München 1995

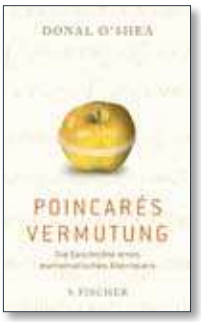
The external connections of Sanxingdui. Von Lothar von Falkenhausen in: Journal of East Asian Archaeology, Bd. 5, Heft 1 – 4, S. 191, 2003

Anyang and Sanxingdui: Unveiling the mysteries of ancient chinese civilizations. Von Chen Shen. Royal Ontario Museum, Toronto 2002

Weblinks hierzu finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/903047.

MATHEMATIK

Ein Jahrhundertproblem – und die Menschen dazu



Die Poincaré'sche Vermutung bietet Stoff für ein Sachbuch und einen Roman zugleich.

Selten macht ein mathematisches Problem derartige Schlagzeilen. Dass eine prominente Vermutung ein Jahrhundert lang den Bemühungen der größten Meister trotzt, ist schon ungewöhnlich; dass aber derjenige, der es endlich geschafft hat, Ruhm, Ehre und die attraktivsten Stellenangebote schlicht ablehnt, löste ein gewaltiges Medienecho aus (Spektrum der Wissenschaft 10/2006, S. 108). Donal O'Shea, Mathematikprofessor am Mount Holyoke College in Massachusetts, erzählt nun nicht nur die Geschichte von Grigorij Perelman, sondern auch die Mathematik dazu. Es ist ein Meisterwerk geworden.

Die titelgebende Vermutung des französischen Mathematikers Henri Poincaré (1854 – 1912) ist eines der sieben Jahrtausendprobleme, auf deren Lösung das Clay Mathematical Institute im Jahr 2000 ein Preisgeld von je einer Million Dollar ausgesetzt hat. Es geht darum, ob und wie wir eine Frage nach der möglichen Gestalt unseres Universums im Rahmen der Topologie anhand einfacher Kriterien beantworten können (Spektrum der Wissenschaft 9/2004, S. 86). Topologie ist das Teilgebiet der Mathematik, das Objekte nicht anhand von Größen wie Winkeln oder Längen beschreibt, sondern die »stetigen Verformungen« untersucht, mit denen ein Objekt in eine andere Gestalt überführt werden kann, ohne es dabei zu »beschädigen«, also zum Beispiel zu zerreißen oder Teile davon zusammenzukleben.

Zwei Kapitel über den Löser des Problems bilden den Rahmen des Buchs: Zu Beginn beschreibt der Autor, wie Grigorij Perelman 2003 bei einem Vortrag in Cambridge (Massachusetts) seinen Beweis der Poincaré-Vermutung der Öffentlichkeit vorstellte. Am Ende steht ein Kapitel über den Internationalen Mathematikerkongress in Madrid 2006, zu dem Perelman nicht erschien, weil er es ablehnte, dort mit der Fields-Medaille, dem »Nobelpreis für Mathematiker«, ausgezeichnet zu werden.

In einer ersten Rückblende erklärt der Autor, welche dreidimensionalen Mannigfaltigkeiten (das sind die Gegenstände der Vermutung) es überhaupt gibt und was genau Poincaré vermutete. Die dafür notwendigen Begriffe führt er geschickt und anschaulich ein, indem er zunächst die Frage nach der Gestalt der Erdoberfläche abhandelt, also seit wann wir Menschen überhaupt wissen können, dass wir auf der Oberfläche einer Kugel leben und nicht etwa auf einem Zylinder oder einem Torus.

Damit hat O'Shea die Reiseroute abgesteckt und stellt in der zweiten Rückblende wichtige Mathematiker und ihre revolutionären Ideen vor, die in diesem Zusammenhang eine Rolle spielen. In den individuellen Schicksalen und Biografien ihrer Entdecker verleiht der Autor den mathematischen Theoremen ein persönliches Gesicht.

Die Rivalen Poincaré und Klein spornten einander zu Höchstleistungen an – bis an den Rand ihrer Kräfte

Er beginnt bei dem antiken Mathematiker Euklid und seinen »Elementen«. Ausgehend von den überlieferten Rechenregeln der Babylonier formulierte Euklid klar die zu Grunde liegenden Definitionen und trennte Axiome und Postulate – also die Grundannahmen und Forderungen, die man ohne Nachweis als wahr annimmt – von mathematischen Sätzen, die aus diesen abgeleitet werden. Mit dieser enormen Abstraktionsleistung schuf Euklid die Grundlage für die Mathematik der folgenden Zeit.

Vor allem sein »Parallelenpostulat« rief dabei die Kritiker auf den Plan: Es besagt, dass es durch einen Punkt außerhalb einer Geraden genau eine Parallele zu dieser Geraden gibt. Es dauerte mehr als 2000 Jahre, bis János Bolyai (1802 – 1860) ein Modell einer »nichteuklidischen Geometrie« entwickelte, in der das Parallelenpostulat falsch ist. Bolyai war bis an sein Lebensende frustriert, nachdem der »Fürst der Mathematiker«, Carl Friedrich Gauß (1777 – 1855), ihm mitgeteilt hatte, dass seine Ergebnisse zwar korrekt, Gauß aber bereits bekannt seien. Dieser wiederum hatte seine Entdeckung nicht publik gemacht, weil er sich ihrer Sprengkraft bewusst war und keine Revolution auslösen wollte, da er stets um seine Stellung fürchtete.

Die zweite Hauptperson des Buchs ist Bernhard Riemann (1826 – 1866). In seiner Habilitationsvorlesung schuf er die gesamte Geometrie neu, indem er die zu untersuchenden Objekte von ihrer »geometrischen Struktur« (mit Eigenschaften wie etwa der Krümmung) unterschied. Damit lüftete er auch das Geheimnis des Parallelenpostulats: In Riemanns Sprache ausgedrückt gilt es nur in Räumen, deren Krümmung überall gleich null ist.

Zentrale Kapitel des Buchs beschreiben, wie Henri Poincaré im Lauf seiner topologischen Studien seine Vermutung schließlich in der endgültigen Fassung formulierte. Dabei spornte die Rivalität mit Felix Klein (1849 – 1925) beide immer wieder zu Höchstleistungen an, brachte sie aber zugleich auch an die Grenzen ihrer Kräfte.

In diesem Abschnitt wählt der Autor ein recht hohes Tempo und verlangt dem Leser einiges an geometrischem Vorstellungsvermögen ab, um auch bei schwierigeren Themen schnell zu den interessanten Fragen zu gelangen. Hier fühlt man sich von der Vielzahl der neuen Begriffe etwas überrumpelt.

Nun ist die Vermutung jedenfalls formuliert, und wir sind im 20. Jahrhundert angekommen. O'Shea beschreibt, wie zahlreiche bedeutende Mathematiker mit ihren Beweisversuchen scheiterten, dabei aber Verbindungen zwischen der Topologie und anderen Disziplinen der Mathematik, vor allem der Algebra, knüpften. Gegen Ende des 20. Jahrhunderts rückte William Thurston die Geometrie wieder mehr ins Zentrum der Betrachtungen.

Schließlich endet die Reihe bei Perelman und seinem Beweis der Vermutung. Dieser scheut das Rampenlicht so sehr, dass er seine Ergebnisse nicht in einer Zeitschrift veröffentlichte, sondern sie nur auf einem Preprintserver im Internet zur Verfügung stellte, jede Art von äußerer Anerkennung ablehnte und die Stellenangebote amerikanischer Spitzenuniversitäten ignorierte.

Insgesamt gelingt dem Autor in diesem Buch eine ausgewogene Mischung aus Anekdoten und historischen Schilderungen einerseits und mathematischen Erläuterungen andererseits. Man findet im gesamten Text nicht eine Formel, stattdessen wird der Blick des Lesers stets geschickt auf das We-

sentliche gelenkt. Allzu technische Details einiger Begriffe werden aus dem Text ausgeklammert und ausführlich im Anhang erläutert. Dieser enthält neben umfassenden Fußnoten, Quellenangaben und Literaturtipps zum Weiterlesen auch ein Glossar zentraler mathematischer Begriffe, ein Verzeichnis der im Text genannten Personen sowie eine Zeittafel, auf der die Entwicklung der Mathematik in einen allgemeinen historischen Kontext gestellt wird.

Leider hat der Verlag es offensichtlich nicht für nötig befunden, die mathematischen Fachbegriffe von einem Mathematiker übersetzen zu lassen. Infolgedessen leidet der Lesefluss an mehreren Stellen unter unnötig verworrenen Erläuterungen mathematischer Begriffe. Wenn aus den reellen Zahlen gelegentlich »reale Zahlen« werden, traut man seinen Augen kaum. Der Gesamteindruck des Buchs wird dadurch ein wenig getrübt.

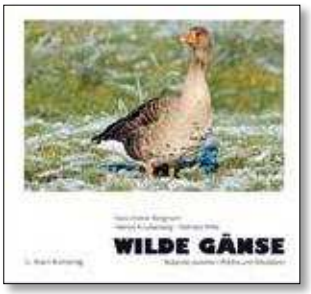
Henning Hollborn

Der Rezensent promoviert an der Universität Mainz im Fach Mathematik.

Donal O'Shea
Poincarés Vermutung
Die Geschichte eines mathematischen Abenteuers
Aus dem Amerikanischen von Hartmut Schickert.
S. Fischer, Frankfurt am Main 2007.
384 Seiten, € 19,90

ZOOLOGIE

Unbeschreibliches Geschnatter



Der Abflug einer vieltausendköpfigen Gänseschar aus einem See ist ein eindrucksvolles Erlebnis.

Dunkel ist es. Nasskalt. Warum frieren wir freiwillig an diesem frühen Herbstmorgen an einem brandenburgischen Seeufer? Sehen können wir noch nicht viel. Aber wir hören sie! Fast 20 000 Gänse und einige tausend Kraniche haben für die Nacht Schutz vor ihren Feinden im See gesucht. Unbeschreiblich ist der Augenblick im Morgengrauen, in dem sich die Vögel in einer einzigen dunklen Wolke aus dem Wasser erheben und fast ohrenbetäubend schnatternd über uns hinwegziehen.

Kaum etwas hat mich jemals so beeindruckt wie das Lever der Gänse am Gülper See. Selten fühlte ich mich so konzentriert und entspannt wie bei unseren Bestimmungsübungen entlang der Felder, welche die Vögel tagsüber abweiden: Saatgans oder Graugans oder Blässgans? Rosa Schnabel? Orangefarbene Füße?

Ein Buch wie »Wilde Gänse« hätte unsere Reiselektüre und unsere Beobachtungen bereichert. Wie sehr haben wir uns gewünscht, mehr über die Vögel zu erfahren als nur Größe oder Schnabel- und Fußfarbe. Hier können wir es nachlesen! Die Autoren beantworten für unsere wild lebenden Gänsearten die Fragen: Wie sehen sie aus? Wie viele gibt es? Wo leben sie? Wie leben sie? Sie beschreiben ausführlich Sozialverhalten, Lebensweise und Ökologie. So lernen wir, dass manche Gänse ihr Nest in der Nähe der Gelege von Raubvögeln bauen, denn diese bieten ihnen Schutz vor ihren Feinden, ohne ihnen selbst gefährlich zu werden.

Zahlreiche Bilder sprechen eine eigene Sprache und veranschaulichen Balzverhalten, Aggression oder das Familienleben. Wir wussten natürlich, dass Gänsepaare zum Teil ein Leben lang zusammenbleiben, neu war uns aber, dass die Ganter ihre Gefährtin beim Fressen begleiten und beschützen – und vor potenziellen Rivalen bewachen. Selbstverständlich berichten die Autoren sowohl über die Arbeiten des »Gänsevaters« Konrad Lorenz als auch über moderne Methoden der Verhaltensforschung wie »radio tracking« oder Telemetrie.

Das Phänomen Vogelzug darf natürlich nicht fehlen. Die Autoren erläutern Ursachen und Vorteile dieses Kraft raubenden Verhaltens sowie Überwinterungsgebiete und Sommerlebensräume. Sie beschreiben internationale Abkommen, Richtlinien und Gesetze, die in unserer modernen und engen Welt die Gänse schützen sollen.

Ich finde die Beiträge zum Thema »Gänsetourismus« mit all seinen Chancen und Risiken besonders interessant. Der Leser erhält Hinweise auf Beobachtungsgebiete und Veranstaltungen sowie Tipps, wie man die Tiere beobachten kann, ohne sie zu stören. Auch zum Thema Vogelgrippe geben die Autoren sachliche Informationen. Literaturquellen und Internetadressen runden das wirklich lesenswerte Buch ab.

Ursula Loos

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und nach langjähriger Mitarbeit bei Spektrum Akademischer Verlag freie Redakteurin und Lektorin.

Aufgescheuchte Gänse verbrauchen 15-mal so viel Energie wie am Boden fressende.

Hans-Heiner Bergmann, Helmut Kruckenberg und Volkhard Wille
Wilde Gänse
Reisende zwischen Wildnis und Weideland
G. Braun, Karlsruhe 2006. 108 Seiten, € 26,80

WISSENSCHAFT ALLGEMEIN

Warum Frauen trotzdem schneller den Weg finden

Hundert Zuschauerfragen samt Antworten aus der Fernsehsendung »nano« sind zu einem unterhaltsamen Buch zusammengestellt.

Warum lachen Männer weniger? Das mag sich so manche Frau angesichts eines morgenmuffeligen Ehemanns und mies gelaunter Kollegen fragen. Die Antwort ist relativ einfach: Männer waren in grauer Vorzeit meist als Einzelgänger mit der Jagd beschäftigt, während Frauen in Grüppchen in Höhlen saßen und sich der Pflege der sozialen Beziehungen widmeten. Und diese gestalten sich bekanntlich besser, wenn auch mal gelacht wird.

Meist haben die Autoren aus der »nano«-Redaktion des Fernsehsenders 3Sat allerdings Schwierigeres zu leisten. Sie erklären uns zum Beispiel, warum die DNA trotz ihrer vielen Basen eine Säure ist: Sie hat ein Rückgrat aus Phosphaten, die Protonen binden und wieder abgeben können, und ein Protonen-Donator (»Protonen-Spender«) ist chemisch dasselbe wie eine Säure. Oder dass eine Stradivari nicht etwa wegen der handwerklichen Kunstfertigkeit des Meisters so besonders gut klingt, sondern weil durch die Beschaffenheit des Materials vor allem die Frequenzen verstärkt werden, die dem menschlichen Ohr am gefälligsten erscheinen. Und vieles mehr. Der Alltag bietet einen unerschöpflichen Fundus an erstaunlichen Tatsachen.

Und immer mehr Menschen scheinen sich für deren wissenschaftliche Erklärung zu interessieren. Wissen ist »in«. Eine steigende Zahl entsprechender Fernsehsendungen und Zeitschriften zeugt davon. »nano« zeigt sich dabei besonders publikumsnah: Seit über drei Jahren beantwortet die Redaktion wöchentlich Zuschauerfragen; zweimal hat sie die spannendsten bereits in Büchern zusammengefasst. Das vorliegende Exemplar ist der Nachfolger zu »Warum Frauen schneller frieren« und erklärt abermals hundert Alltagsphänomene.

»Warum Männer weniger lachen« bewegt sich ungefähr in der Mitte zwischen den Polen seicht und anspruchsvoll: Es ist leicht zu lesen, die Autoren schreiben locker, aber sachlich. Gleichzeitig behandeln sie auch schwierige Themen und schrecken selbst vor der einen oder anderen mathematischen Formel nicht zurück.

Bei der inflationären Zunahme an Wissenssendungen und -druckwerken sind Doppelungen nicht zu vermeiden. Ob Frauen sich wirklich schlechter orientieren können als Männer oder warum man immer in der falschen Warteschlange steht, hat man schon anderswo beantwortet bekommen. Der Leser findet aber auch exotischere Themen, zum Beispiel die Entstehung einer La-Ola-Welle, und kann sich mit Alltagsklassikern auseinandersetzen wie dem anhänglichen Duschvorhang, den es unweigerlich nach innen zieht.

Alles in allem eine runde Sache, gut zum Verschenken, Schmökern und Stillen der eigenen Neugier.

Anke Römer

Die Rezensentin ist Diplompsychologin und Wissenschaftsjournalistin in Mannheim.

Janka Arens, Markus Peick, Meike Srowig
Warum Männer weniger lachen
100 weitere Alltagsphänomene wissenschaftlich erklärt
C.H.Beck, München 2006. 166 Seiten, € 9,90

BIOKYBERNETIK

Bioroboter und ihre tierischen Vorbilder

Die Techniker können von der Natur eine Menge lernen; aber simples Kopieren des natürlichen Vorbilds ist meist unmöglich.

Wüstenameisen haben ein fotografisches Gedächtnis: Sie machen einen Schnappschuss von der Umgebung ihres Nestes, bevor sie auf Nahrungssuche gehen. Das Bild der Heimat im Gedächtnis führt sie von den Nahrungsplätzen nach Hause. Diese Schnappschuss-Navigation ist nur eine von vielen Erfindungen der Natur, die Ingenieure kopieren wollen. Ihr Ziel sind Roboter, die sich selbstständig in der Welt zurechtfinden. In der Zukunft könnten Schlangenroboter Verschüttete aufspüren und Hummerroboter unter Wasser Giftquellen erschnuppern.

Der technische Informatiker Ralf Möller aus Bielefeld schwelgt nicht in solchen Zukunftsvisionen. Die Bioroboter der ersten Generation, die er in seinem Buch vorstellt, könnten die Labore nicht verlassen, ohne über den nächsten Treppenabsatz zu stolpern. Sie sind Hilfsmittel für Biologen, um deren Modellvorstellungen vom Verhalten der Tiere zu testen. Sie wurden gebaut, um zu verstehen, wie die Schnappschuss-Navigation der Wüstenameisen funktioniert oder wie Tunfische mit ihrer Körper- und Flossenbewegung den Strömungswiderstand des Wassers niedrig halten. Ingenieure hoffen, dass dabei einmal technische Anwendungen abfallen.

Was Möllers Buch dennoch spannend macht, ist der Insider-Einblick. Er nimmt den Leser mit in die tunesische Wüste, um Ameisen zu beobachten, und erklärt anschaulich die von Biologen und Ingenieuren entwickelten Modelle der Schnappschuss-Navigation. Der Leser darf Möller beim Zusammenlöten eines Robotergehirns über die Schulter schauen, dessen elektronische Bauelemente auf ähnliche Weise verknüpft sind wie die Nervenzellen im Ameisenhirn. In der Wüste findet der Ameisenroboter sein »Nest« wieder, erreicht aber bei Weitem nicht die Leistungen seiner tierischen Vorbilder. Eine reale Laufmaschine stolpert seltener als eine im Computer simulierte Stabheuschrecke; Platz raubende analoge Elektronik simuliert natürliches Verhalten oft besser als digitale Mikrochips.

Je mehr die Ingenieure verstehen, desto leichter können sie entscheiden, welche As-

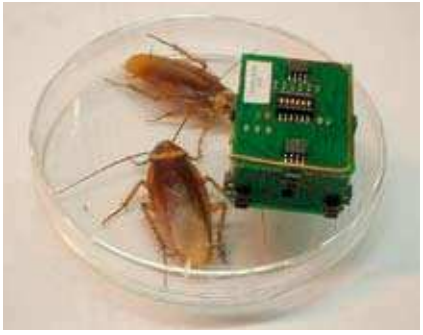
Der InsBot *(insect-like robot)* von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne ist so programmiert, dass er sich gerne mit seinen natürlichen Vorbildern, den Küchenschaben, zusammentut.

pekte des natürlichen Designs in technische Anwendungen übernehmbar sind, von Spezialtricks einzelner Tierarten wie dem Polarisationskompass von Wüstenameisen bis zu der allgemeinen Einsicht, dass ein zentrales Gehirn fehlerhafter und langsamer arbeitet als ein verteiltes Netzwerk von Nervenzellen. Andererseits werden auch die Grenzen dessen deutlich, was Ingenieure von der Natur lernen können. So ist simples Kopieren der tierischen Vorbilder meist unmöglich. Dazu ist die Natur viel zu komplex.

Die Kehrseite von Möllers Bodenständigkeit ist die fehlende Vision. Werden uns in Zukunft selbststeuernde Autos sicher durch den dichten Straßenverkehr bringen? Werden Teams mobiler Roboter einmal Waldbrände löschen oder verminte Gebiete säubern? Derlei Fragen bleiben unbeantwortet. Der Autor deutet nur wenige mögliche Anwendungen an, meist fernab der Alltagserfahrung, beispielsweise Laufmaschinen für den Einsatz in der Raumfahrt.

Mangels einer verbindenden Vision wirkt Möllers Darstellung wie eine Methodensammlung der Biorobotik: Navigation von Insekten im ersten Kapitel; im zweiten die Sinnesorgane der Tiere und deren Nachbau zum Beispiel in einem Bewegungsdetektor, der dem Fliegenauge nachempfunden ist. Im dritten geht es um Bewegung: Roboter lernen laufen wie Stabheuschrecken oder schlagen ihre Flügel wie Fliegen. Die beiden letzten Kapitel sind eher ergänzende Anhängsel. Möller beschreibt die Interaktion von Biorobotern mit lebenden »Artgenossen« und fasst den Weg vom Verhaltensexperiment bis zum Robotermodell zusammen.

Geschrieben ist das Werk wie ein naturwissenschaftliches Lehrbuch, mit sauberer Trennung von experimentellem Befund und Interpretation, reichlich Fotos und Diagrammen sowie einer ausführlichen Literaturliste zu jedem Kapitel. Technische oder naturwissenschaftliche Vorbildung ist hilfreich für das Verständnis, auch wenn Möller Formeln vermeidet und jeden Fachbegriff zuvor auf verständliche Weise erläutert.



rowohlt www.rowohlt.de

© Bernd Ebsen

Korruptionspflichtig

Markus Grill über die Machenschaften der Pharmaindustrie

Markus Grill
Kranke Geschäfte
224 Seiten. Klappenbroschur
€ 16,90 (D)

Bei aller Nüchternheit der Darstellung kommen sowohl Biologie- als auch Technik-Interessierte auf ihre Kosten. Erstere staunen über die Perfektion der Natur. Letzteren zeigt Möller sehr konkret, wie Ingenieure von der Natur lernen und wo dabei die Grenzen verlaufen. Der abstrakte Begriff »Bionik« gewinnt für alle Leser deutlich an Konturen.

Versäumen Sie nicht, sich auch die Internetseite http://www.ti.uni-bielefeld.de/ameisenpatent zum Buch anzusehen. Hier kann man, neben anderen Bildern, Links und Videos dem Ameisenroboter beim Navigieren zusehen.

Christian Meier

Der Rezensent hat Physik studiert und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Darmstadt.

Ralf Möller
Das Ameisenpatent
Bioroboter und ihre tierischen Vorbilder
Elsevier, Spektrum Akademischer Verlag, München 2006. 204 Seiten, € 19,50

LEBENSMITTELKUNDE

Einblick ins Eingemachte

Welches Supermarktprodukt kann man noch guten Gewissens essen? Was die Autoren an Einzelheiten präsentieren, ist sehr unappetitlich – aber unentbehrlich für Gesundheitsbewusste.

Ein Becher Erdbeerjoghurt enthält wesentlich weniger Erdbeeren, als es den Anschein hat: im Durchschnitt eine halbe Frucht. Alle übrigen vermeintlichen Fruchtstückchen bestehen aus Obstabfällen und Pressrückständen. Das Antibiotikum Natamycin wird in der Lebensmittelindustrie als Konservierungsstoff für Wurst und Käse und in der Medizin gegen Fußpilz und Vaginalmykosen eingesetzt. Sonnengelb leuchtet der Farbstoff Tartrazin (E 102). In Deutschland war er eine Zeit lang verboten, da Konsumenten über Seh- und Atemstörungen klagten, darf aber seit den EU-Angleichungen 2002 wieder in Brausen, Backwaren, Puddingpulver, Käserinde, Weingummi und vielem mehr verwendet werden.

Eine lange Liste mit Unappetitlichkeiten dieser Art, die damit jährlich erwirtschafteten Milliardenumsätze und die berechnende Marketingmaschinerie, die mit dem Verbraucher und dessen Gesundheit spielt, sind Themen des vorliegenden Buchs. Die Autoren, beide als Wissenschaftsjournalisten tätig, kommen vom Fach: Marita Vollborn arbeitete als Lebensmitteltechnologin im Management von Langnese-Iglo (Unilever), und Vlad D. Georgescu forschte als Chemiker an Nachweisverfahren und -grenzen für Schadstoffe und Belastungssubstanzen.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Moderne Lebensmittel sollen gesund sein oder erheben gar den Anspruch, gesund zu machen, wie die Margarine, die angeblich meinen Cholesterinspiegel senkt. Doch der Verbraucher ist zunehmend verwirrt: Was verbirgt sich hinter Schlagwörtern wie »Functional Food« oder »Nanofood«? Was ist davon zu halten, wenn Lebensmittel mit Vitaminen, probiotischen Bakterienkulturen oder sekundären Pflanzenstoffen angereichert sind? Das Buch versucht diese Fragen zu beantworten, liefert dabei aber keine Handlungsanweisungen. Auf über 300 Seiten warten die Autoren mit detail- und kenntnisreichen Hintergrundinformationen auf.

Der Text liest sich flüssig und ist allgemein gut verständlich. Ergänzt werden die Inhalte durch zahlreiche Tabellen und Schaubilder. Stets hat man das Gefühl, fundiert informiert zu werden. Alle Aussagen sind mit einer Fülle von Verweisen auf aktuelle Forschungsergebnisse, Geschäftsberichte und Stellungnahmen aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik belegt. Vollborn und Georgescu sind in ihrer Darstellung oft plakativ: »Wir essen uns krank, und die Lebensmittelindustrie liefert den Stoff, der uns süchtig macht.« Mehr als einmal vergeht einem die Lust an der einen oder anderen lieb gewordenen Leckerei.

Neben der Nahrungsmittelverarbeitung beschäftigt sich das Buch auch mit den Rohstoffen, aus denen die Lebensmittel hergestellt werden. Es wird auf Schwachstellen, Missbrauch und mögliche daraus resultierende Folgen hingewiesen. Als Paradebeispiel dient der BSE-Skandal. Dabei sind nicht nur wissenschaftliche Aspekte, sondern auch innen- und außenpolitische Verwicklungen Thema. Tiermehl, hergestellt aus Schlachtnebenprodukten und Tierkörpern, die wegen Krankheit getötet wurden oder gestorben sind, darf nicht an Lebensmittel liefernde Tiere wie Rinder verfüttert werden. Das leuchtet ein. Aber macht das Gesetz auch dann Sinn, wenn dessen Einhaltung kaum kontrolliert wird?

Ebenfalls in diesem Kapitel werden Pestizide, Acrylamid als ein Problem bei der Zubereitung von Lebensmitteln sowie der »Kriegsschauplatz« Genfood angesprochen. »Gentechnisch veränderte Nutzpflanzen sind die Regel, nicht die Ausnahme«, sagen die Autoren und klären uns darüber auf, dass in etwa 20000 Lebensmitteln Soja mit verändertem Erbgut vorkommen kann. Manche Probleme bestehen eben fort, auch wenn die Aufregung darüber in den Medien längst abgeklungen ist.

Die Sammlung all dieser Fakten soll nach Aussagen der Autoren nicht dazu dienen, »eine ganze Branche zu diskreditieren« oder eine »Anleitung zum Umstieg auf Bioprodukte sein«. Das Buch soll aufklären und informieren, will einen »Einblick ins Eingemachte erlauben«, damit am Ende jeder für sich entscheiden kann, »was er in Zukunft glauben und vor allem essen kann«.

Das ist selbst nach der Lektüre des Buchs nicht ganz einfach – aber nicht etwa, weil die Autoren ihr Ziel verfehlt hätten, sondern wegen der von ihnen angesprochenen raffinierten Strategien der Lebensmittelindustrie. Ein letztes Beispiel: Steht auf der Zutatenliste von Eistee Karamell, ist damit eine Gruppe von Farbstoffen namens Zuckercouleur (E 150) gemeint. Einer dieser Farbstoffe, Ammoniak-Zuckercouleur (E 150c), enthält eine Komponente, welche die Anzahl der Lymphozyten im Blut verringert. Woher soll ich als Laie das wissen?

Hintergründe dieser Art machen das Buch für mich so interessant und veranlassen mich dazu, zukünftig kritischer durch die Supermarktregale zu streifen.

Susanne Gellweiler

Die Rezensentin ist Diplombiologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Mainz.

Marita Vollborn, Vlad D. Georgescu
Die Joghurt-Lüge
Die unappetitlichen Geschäfte der Lebensmittelindustrie
Campus, Frankfurt am Main 2006. 300 Seiten, € 19,90

VORSCHAU

Heft November 2007
ab 30. Oktober im Handel

KENN BROWN (ILLUSTRATION) UND EMILY HARRISON (FOTO)

Erde ohne Menschen

Was wäre, wenn *Homo sapiens* von heute auf morgen verschwände? Alan Weisman, der dieser Frage in einem Aufsehen erregenden Buch nachgeht, erläutert seine Thesen in einem Interview

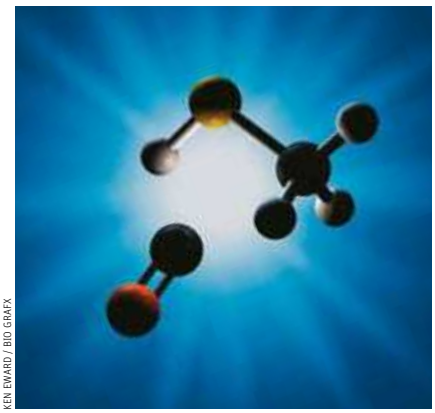
WEITERE THEMEN IM NOVEMBER

Der sechste Sinn der Haie

Elektrosensoren verraten den Meeresräubern, wo sie zubeißen müssen. Das ließe sich für ein Abwehrgerät nutzen

Dreidimensionale Displays

Endlich können Computer Objekte nicht nur zweidimensional darstellen, sondern in räumlichen, von allen Seiten betrachtbaren Ansichten



KEN EWARD / BIO GRAFX

Starterkit für das Leben

Vergessen Sie DNA und RNA! Als Ausgangspunkt des Lebens sind sie viel zu kompliziert. Netzwerke chemischer Reaktionen bieten eine plausible Alternative

LOCKHEED MARTIN CORP., STEPHEN C. HARTMANN

Zukunft der Raumfahrt

Die Erde, die Planeten und der Rand des Sonnensystems sind das Ziel ehrgeiziger neuer Missionen. Sie sollen die Grenzen des Machbaren neu abstecken

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter